حقائق عن كوكب الأرض

تحرير

جيرارد بييل

ترجمة

د.علي ناصف

تقديم ومراجعة

د. أحمد المراغي

الكتاب: حقائق عن كوكب الأرض

الكاتب: جيرارد بييل

ترجمة : د.علي ناصف

تقديم ومراجعة : د. أحمد المراغي

الطبعة: ٢٠١٩

صدرت الطبعة الأولى عام ١٩٦١

الناشر: وكالة الصحافة العربية (ناشرون)

٥ ش عبد المنعم سالم – الوحدة العربية – مدكور- الهرم – الجيزة

جمهورية مصر العربية

هاتف : ٣٥٨٢٥٢٩٣ ـ ٣٥٨٦٧٥٧٦ ـ ٣٥٨٦٧٥٧٥

فاكس : ٣٥٨٧٨٣٧٣

APA

E-mail: news@apatop.comhttp://www.apatop.com

دار الكتب المصرية

فهرسة إثناء النشر

بييل ، جيرارد

حقائق عن كوكب الأرض / جيرارد بييل ، ترجمة : د.علي ناصف، تقديم ومراجعة : د. أحمد المراغي – الجيزة – وكالة الصحافة العربية.

٢٣٦ ص، ١٨ سم.

الترقيم الدولى: ٠ – ٩١٢ – ٤٤٦ – ٩٧٧ – ٩٧٨

أ – العنوان رقم الإيداع : ٤٦٩١ / ٢٠١٩

حقائق عن كوكب الأرض



مقدمة

الكون هو شيء مُبهم لا نعلم عنه سوى القليل، والأرض هي كوكب صغير جداً بين ملايين الكواكب والنجوم والمجرات التي تملأ الكون، ويقوم العلماء المختصون بالفلك والفيزياء بعمل العديد من الدراسات والأبحاث للتوصل إلى معلومات جديدة بشأن الكون والفضاء، وفي الواقع فإن هناك العديد من الحقائق المدهشة التي يتم اكتشافها يومياً في هذا الأمر، وبعض تلك الحقائق تكون مدهشة وغريبة بعض الشيئ والتي ربما لا نعرف عنها الكثير، فنجد مثلاً أن هُناك تضاربا كبيرا في درجات الحرارة في كوكب عطارد ، فكوكب عطارد هو أحد الكواكب التي تقع بالقرب من الشمس لدرجة كبيرة، وبالرغم من ذلك فإنه يتمتع بتضارب شديد في درجات الحرارة خلال النهار والليل، حيث تُقدّر درجة حرارته ليلاً حوالي ١٨٠ درجة مئوية تحت الصفر، أما في النهار فترتفع درجة الحرارة كثيراً لتصبح حوالي ٤٠٠ درجة مئوية فوق الصفر، وربما يرجع السبب إلى عدم امتلاكه لغلاف جوي.

كما حاول العلماء أثناء بحثهم أن يعثروا على كواكب تصلح للحياة، إلا أن أغلب دراساتهم وصلت إلى وجود كواكب شديدة الحرارة أو شديدة البرودة مما يجعلها غير صالحة للحياة، ولكن أثناء الدراسة التي تمت مؤخراً في ٢٠١٢ استطاع العلماء التوصل إلى خمسة كواكب تقع خارج المجموعة الشمسية، ورجّحوا أن هناك إمكانية للعيش على سطح تلك الكواكب.

كما يتمتع الفضاء بمجموعة روائح مميزة توصل إليها رواد الفضاء بعد قيامهم بالعديد من الرحلات للفضاء الخارجي وإجرائهم لدراسات مختلفة للتركيبات الغازية في الفضاء حيث أنهم أكدوا أنه بالفعل يحتوي على روائح معينة يُمكن للإنسان أن يُميزها، فقد لاحظ رواد الفضاء وجود روائح مشابهة لرائحة المعادن واللحام المحروق، كذلك هناك دراسة أثبتت وجود رائحة مشابهة للتوت تصدُر عن مركب Ethyl Formate الموجود في مركز المجرة.

كما أكد العلماء أنه يولد أكثر من ٢٧٥ مليون نجم يوميا ، حيث حاول علماء الفلك الوصول إلى عدد تقريبي للنجوم التي تولد في مجرة درب التبانة، وتوصلوا إلى أنه في السنة الواحدة هناك ما يقرب من ١٠٠ مليار نجم جديد يظهر في الفضاء، بمعنى أنه خلال اليوم الواحد يُمكن أن يصل عدد النجوم الجديدة إلى ٢٧٥ مليون نجم، كما أنهم رجحوا أن بعض المجرات الأخرى يُمكن أن تكون قادرة على إنتاج هذه النجوم بشكل أسرع من مجرتنا.

كما أكد العلم أن نوع المطر يختلف باختلاف الكوكب الموجود فيه؛ فكوكب الأرض يتميز بسقوط أمطار مكونة من قطرات الماء أو الثلج، أي أنه لا يدخل في تكوينه أي مركبات أخرى غير الماء، إلا أن الأبحاث التي تمت على كواكب الفضاء الخارجي قد أثبتت أن الأمطار التي تسقط بها تختلف تماماً عن أمطار الكرة الأرضية، فمثلاً كوكب الزهرة يتميز بسقوط

مطر من حمض الكبريت، بينما مطر كوكب نبتون مكون من الألماس، كما يسقط على سطح القمر مطر الميثان.

كما أكد العلماء أنه يوجد كمية من الماء على سطح القمر، حيث تتوالى اكتشافات العلماء التي يتوصلون إليها بشأن القمر، وقد شهد عام ٢٠٠٩ اكتشافا جديدا حيث اكتشف العلماء بأن القمر يحتوي على كمية من المياه المُتجمدة على سطحه، وقد تأكدوا أن هذه المياه مُركزة بشكل أكبر في ناحية الأقطاب، وقد كان هذا الاكتشاف نتيجة ارتطام مركبة LCROSS في القمر حيث أحدث هذا الارتطام فوهة وصل قطرها إلى ٢٠ مترا، وأثناء بحثهم في المواد التي خلّفها هذا الارتطام تم العثور على حوالي ١٠٠ كم من الماء.

أما عن كثافة النجوم النيوترونية فهي كبيرة للغاية، وتُعتبر النجوم النيترونية هي واحدة من أكثر الأجسام كثافة في الكون، حيث يتساوى وزن جزء صغير من المادة المكوّن منها النجم النيتروني مع وزن جبل ضخم من جبال الكرة الأرضية، وقد نتج وجود هذه النجوم نتيجة حدوث انهيار جاذبي لأحدى النجوم الضخمة، ويتميز النجم النيتروني بأنه يمتلك حوله حقلا مغناطيسيا بالإضافة إلى أنه يتمتع بدرجة حرارة عالية للغاية.

ونجد أنه من غرائب الأرض والكون إذا تلامست قطعتان معدنيتان في الفضاء، ستذوبان مع بعضهما وتصبحان قطعة واحدة على الفور، وهذا يُدعى بالالتحام البارد أو الالتحام بالتلامس، وهذا لا يحدث على

الأرض لأن طبقة الأتموسفير للغلاف الجوي تضع طبقة من المواد المؤكسدة على السطوح مما يمنع هذا من الحدوث، وقد يبدو هذا مُشكلة كبيرة بالنسبة للأقمار الصناعية ومحطات الفضاء، ولكن بما أنها أتت أساساً من الأرض فهي مُغطاة مُسبقاً بهذه المواد.

مما سبق نجد أن الأرض والكون الموجودة فيه يعج بالكثير والكثير من العجائب والغراب التي نتشوق لمعرفتها، ومن أجل هذا جاء دور هذا الكتاب المهم الذي يحوي بين دفتيه كنوز غالية من معلومات قيمة ومتخصصة توصل لها العلماء.

د. أحمد المراغي

مقدمة المحرر

الكواكب أشياء مألوفة لنا إلى حد كبير. فشمسنا تجمع حولها تسعة كواكب على الأقل. ويبدو أن كثيرًا غيرها من النجوم تشرق بنورها على مجموعات متشابهة من التوابع. وهذا الكتاب يعالج بنورها كوكب نعرفه أكثر من غيره، ويحتمل أن يكون الكوكب الوحيد الذي سيمكن لجيلنا الحالي أن يستكشفه بنفسه ويكشف أسراره.

ومما يسعدنا أننا مشرفون على إنماء معلوماتنا عن الأرض إلى حد كبير. ففي الوقت الذي يعد فيه هذا الكتاب للطبع. يقوم علماء ثمان وثلاثين دولة بتنفيذ برامج طموحة مبتكرة بمناسبة السنة الجيوفيزيائية العالمية، وسوف ينجز هؤلاء العلماء آلافًا من المشاهدات والقياسات المختلفة في كل أنحاء العالم خلال هذه «السنة» التي تستغرق ثمانية عشر شهرًا (من يوليو سنة ١٩٧٥ إلى ديسمبر ١٩٥٨) ومن ثم، فسوف يمكنهم، بعد سنوات قليلة من دراسات نتائج مشاهداتهم وتفسيراتها، الإجابة على عديد من الأسئلة الأساسية والعلمية فيما يختص بالأرض، باطنها وقشرتها، مائها وهوائها، والكونيات المحيطة بها. وهذا الكتاب يعرض صورة شاملة لما نعلمه الآن ونحن على أبواب هذا المشروع العلمي البالغ الأهمية.وقد تنمي السنة الجيوفيزيائية العالمية مبلغ تفهم كل منا للآخر. فسوف يكون محكاً عملياً للتعاون الدولي المثمر، إذ ستتطلب

الكثير من التنظيمات التي تكفل أجرأ الأرصاد في أوقات واحدة لا تتفاوت بأكثر من جزء من الألف من الثانية فيما بين مراكز الرصد المتناثرة على أبعاد ساشعة على سطح الأرض في مختلف أقطار العالم. وسوف تجرى هذه الأرصاد في «أيام عالمية» محددة أو معلومة.

وعلى جميع مراكز الرصد الاستجابة فورًا إلى نداء يوجه إليها في أيام عالمية أخرى معينة وذلك للاستفادة من ظروف الاضطرابات الشمسية أو من العواصف الكهرومغناطيسية التي تحدث في طبقات الجو العليا. وفي خلال سلسلة طويلة من المؤتمرات المنعقدة في الأعوام المنصرمة، عني العلماء بتوحيد مستوى دقة أجهزتهم في كل مكان، وبإعداد هذه الأجهزة للعمل بذبة واحدة. هذا النوع من التعاون الوثيق مألوف لدى أعضاء المجتمع العلمي الدولي، وسوف يجذب نشاطهم خلال السنة الجيوفزيائية الدولية اهتمام «زملائهم»، فيجدون فيهم مضربًا لمثل طيب للتعاون العلمي.

هذا الكتاب موجه أساساً إلى هؤلاء «الزملاء» ممن لا يشغلون بالعلوم المتصلة بالأرض. فهو نتاج تعاون فريد بين العلماءالذين كتبوا أجزاءه الأربعة عشر وحرري «المجلة الأمريكية العلمية»، حيث نشرت هذه الأجزاء كمقالات خلال الأعوام الماضية. وبتجميعها في كتاب واحد تتكامل لكل موضوع منها عناصره المختلفة. وهذه المقالات مجتمعة تصور مستوى معلوماتنا عن الفيزياء الأرضية، الأمر الذي لا يتوافر في أي كتاب آخر.

يعالج علم الفيزياء الأرضية صفات الأرض، مأخوذة على نطاق واسع، وهي إلى حد كبير صفات كونية عامة، لا تتميز الأرض بها عن غيرها من الكواكب والنجوم. وكما سيتضح في أجزاء هذا الكتاب، يصح اعتبار هذا الكوكب مجموعة من طبقات كرية متحدة المركز: الكرة الصخرية، وتشمل النواة والغلاف والقشرة الأرضية، والغلاف المائي، ويشمل المحيطات وجبال الجليد والقمم الثلجية، ثم الغلاف الجوي للأرض وبأعلاه طبقة الأيونوسفير وما بعدها من طبقات لا تزال رهن الاستكشاف قوامها جسيمات مشحونة. وتنساب خلال كل من هذه الطبقات أنواع متماثلة أو متشابهة من القوى، والمد، والتيارات، وتتشابك كل منها في حركياتها مع غيرها بين الطبقة والأخرى. وفي هذه النظرة المستوعبة سوف لا نتعرض للغلاف الحيوي، ونعني به الطبقة الرقيقة من المادة العضوية حيث تقوم الحياة ويسجل التاريخ.

يناقش الفصل الأول من هذا الكتاب كيف نشأت الأرض؟ وتشير نظرة «سحابة الغبار» الواسعة الانتشار إلى أن الأرض تكونت من زمن يقارب زمن تكون الشمس أثناء تكاثف سحابة ضخمة من المواد النجمية الناقصة التكوين. وتتفق أبحاث يوري وآخرين من علماء الكيمياء الأرضية في موضوع «أصل الأرض» مع مشاهدات المتخصصين والطبقة الغلافية من تحتها تحيطان نواة معدنية لدنة بباطن الأرض. وكما يبين ك. أ. بولينفإن السيسموجراف (جهاز تسجيل الذبذبات الأرضية) الذي يرسم ذبذبات القشرة الأرضية، يدل على أن النواة في حد ذاتها تتكون من طبقات كروية

متحدة المركز. أما القسم الثاني من الكتاب عن أصل حرارة الأرض والمجال المغناطيسي للأرض، فمادته أكثر تأملاً وتخيلاً وحدسًا.

ومن المدهش أن ما يتجمع الآن من معلومات تفصيلية متزايدة عن شكل الأرض الحقيقي تمدن بدليل هام على حقيقة الأحداث والقوى التي تتفاعل داخل الأرض. فدراسات الجاذبية التي يقوم بها وايكو. أ. هايسكاتن تشير إلى أن شكل الأرض لا يعدو كرة شوهتها الضغوط كما أنها مفرطحة عند القطبين. وهذه الفكرة العامة تتفق مع ما يصفه والتر هـ. بوتشر من وجود منخفضات ومرتفعات في صخور الأساس تحت المحيطات والقارات. ويؤكد روبرت ل.فيش وروجر ريفيل في فصلهما عن أخاديد المحيط الهادي الحصول على نفس النتائج فيما يتعلق بطوبوغرافية قاع المحيط. ويمدنا عدم انتظام شكل الأرض، وما يعتري هذا الشكل من تغير مستمر بتفسير معقول لديناميكية بناء الجبال، الأمر الذي يتفق والتخمينات الواردة بالقسم الثاني من باطن الأرض.

ويعتبر توزيع المياه على سطح الأرض من العوامل الهامة في زحزحة حالة الاتزان والاستقرار بالنسبة للقشرة الأرضية. وتغطي المناطق الجليدية الشمالية ومنطقة جرينلاند والجبال الثلجية من سطح الأرض كمية من المياه المتجمدة يبلغ عمقها مائة قدم، وهي إذا ذابت وتدفقت إلى المحيطات، كفيلة بأن تغرق معظم مدن العالم الكبرى. وتنجرف أسطح القارات نتيجة لحركة هذه الثلوج أثناء تقدمها أو تقهقرها. بيد أن الثلوج تشكل نسبة ضئيلة من الغلاف المائي، فالمحطيات التي تحوي ٩٥% من

مياه الأرض تغطي ثلثي مساحة سطح الكرة الأرضية تقريباً. ومن قديم الأزمان استغل البحارة معرفتهم لحركة التارات ودوراتها في المحطات. وإلى عهد قريب لم نكن ندرك إدراكاً شاملاً مستوعباً الفكرة المنطوية تحت دورات المحيطات كما وصفها ولتر. هـ. منك. وهذه الدورات شبيهة بالدورات الجوية إذ أنها تتحرك بنفس القوى المنبثقة من حرارة الشمس ومن دوران الأرض.

ويعطينا هاري ويلكسر نموذجاً تفصيلياً للدورات الجوية التي تعم أرجاء الأرض ويزداد هذا النموذج وضوحاً على مر الأيام، ويعتبر أساساً دائم التحسن للتنبؤ الجوي الطيل المدى. وتستأثر حالة الطقس في طبقات الجو السفلي باهتمام الإنسان، وهي وثيقة الارتباط بما يحدث في طبقات الأيونوسفير في طبقات الجو العليا. فالعواصف التي تطرأ على هذه الطبقات المتأينة تؤثر تأثيرًا مباشراً على حياة الإنسان بقطعها مواصلاته اللاسلكية. ويشرح ت. ن. جوتييه كيف أن فن اللاسلكي بدوره قد مكن الإنسان من إدراك ما يجري عند هذه الارتفاعات الشاهقة إدراكاً مفصلاً.

ففي طبقة الأيونوسفير تتفاعل القوى الواقعة في الحيز الكوني المجاور للغلاف الجوي، وهي تلك القوى التي يمكن مشاهدة آثارها في ظاهرة الوهج القطبي والوميض الجوي الخافت اللذين يصفهما س. ت. الفي وفرانكلين أ. روش. ويتناول ل. ر.أ. ستوري الكلام عن ظاهرة الصفير وهي أداة أخرى من أدوات استكشاف هذه المنطقة. وبتتبع هذه

الإشارات بواسطة أجهزتها اللاسلكية، يمكننا رسم صورة للمجال المغناطيسي للأرض في أعماق الفضاء البعيد.

ولكي يمكن للأجهزة تسجيل المشاهدات عند حافة الفضاء الخارجي تسجيلاً مباشراً، يتوقع العلماء الأمريكيون والسوفييت أن يرسوا أقماراً صناعية تتخذ مدارها حول الأرض. ويصف هومر أ. نيوبل الجهود الخارقة في مضمار الصواريخ وهندسة الأجهزة، تلك الجهود التي ستجعل تحقيق هذه الأمنية غير بعيد المنال.

المحررون

هيئة التحرير

القسم الأول

نشأة الأرض وتكوينها

أصل الأرض

هارلود ك. يوري

هارولد ك. يوري علم من أشهر علماء أمريكا البارزين، وشخصية من أقوى الشخصيات في مجتمعها العلمي. وهو أستاذ الكيمياء بمعهد «انريكوفيمي» للدراسات النووية بجامعة شيكاغو. حصل على درجة البكالوريوس من جامعة مونتانا ١٩١٧، وعلى الدكتوراة في الكيمياء من جامعة كاليفورنيا عام ١٩٢٣، وقضى بعد ذلك عاماً في كوبنهاجن برفقة العالم العظيم نيلز بوهر (Neils Bohr). وباشر يوري بعد ذلك بمعلوماتها الخارقة في الفيزياء والكيمياء النووية عمله التاريخي في فصل الدبوتيريوم وهو أحد النظائر الثقيلة للايدروجين. وفي عام ١٩٣٤ نال على هذا العمل العظيم جائزة نوبل. وكان يوري من القادة الذين لا غنى لأمريكا عنهم في محاولتها العلمية الضخمة لإنتاج القنبلة الذرية خلال الحلاب العالمية الثانية. وبعد ذلك عاد يوري أبحاثه الأصلية. وتفصح مساهمته في هذا الكتاب عن تشعب إنتاجه واتساعه في السنوات الأخيرة، وهو إنتاج بعيد عن اللون الهندسي وعن صناعة الأسلحة، وليس فيه ما هو «مقصور» أو «محدود» أو«سري».

أصل الأرض

هارولد ك. يروي

يحتمل أن يكون الإنسان منذ وهب عقلاً مفكراً قد بدأ يتصور ويحدس كيف امتدت الأرض، وماذا يمسكها أن تقع، وما هي طبيعة الشمس والقمر والنجوم، من أين أتت كلها، وكيف بدأت، وما إلى ذلك من الأمور. وقد سجل الإنسان تصوراته هذه في كتابات دينية. ويعتبر الفصل الأول من سفر الكون مثالاً شاعرياً جميلاً لها. ظلت هذه الكتب قروناً عديدة جزءاً من ثقافتنا، حتى أن كثيرًا منا قد غاب عنه أن بعض أجدادنا الأولين كان لهم آراء محدودة عن الأرض والمجموعة الشمسية، وهي آراء مقبولة لدينا الآن قبولاً تاما.

كان ارستاركاس (Aristarchus) من جزيرة ايجه التابعة لساموس أول من اقترح أن الأرض وغيرها من الكواكب تدور حول الشمس. عارض الفلكيون هذا الرأي إلى أن أيده كوبيرنيكاس (Copernicus) بعد ذلك بألفي عام. وكان اليونانيون يعرفون شكل الأرض وحجمها على وجه التقريب، كما كانوا يعرفون سبب كسوف الشمس. وبعد كوبيرنيكاس راقب الفلكي الهولاندي تايكو براهي (Tycho Brahe) تحركات كوكب المريخ من مرصده بجزيرة هافن الواقعة ببحر البلطيق. ومن هذه المشاهدات استطاع جوهانز كبلر (Johannes Kepler) أن يبين أن

المريخ والأرض وغيرهما من الكواكب تدور كل منها حول الشمس في مدار على شكل قطع ناقص. وبعد أن وضع العالم العظيم اسحق نيوتن (Isaac Newton) قانون الجاذبية العام وقوانين الحركة، أمكن استنباط وصف دقيق للمجموعة الشمسيةبأكملها. وقد شغل هذا الأمر أذهان كبار العلماء والرياضيين في القرون التي تلت ذلك.

ومن سوء الطالع، أن وصف مصدر المجموعة أمر يفوق كثيرًا في صعوبته وصف تحركات أجزاء هذه المجموعة فالمواد التي توجد الآن بالأرض وبالشمس لابد وأنها تختلف في حالتها عما كانت توجد عليه عند بدء نشأتها. ويتطلب فهم الكيفية التي تجمعت بها هذه المواد الإلمام بكثير من فروع العلوم الحديثةكالنظرية الجزئية للغازات، والديناميكا الحرارية، والنشاط الإشعاعي، ونظرية الكم. ومن ثم فليس مستغربًا ألا يحرر المشتغلون بعلم الأرضتقدمًا ملموسًا حتى مطلع القرن العشرين.

ومنذ ستين عامًا افترض السير جورج داروين (Sir Gorge Darwin) أن القمر قد انفصل أصلاً عن الأرض من المكان المعروف الآن لدينا بالمحيط الهادي، وهذا الافتراض يسود عند الكثير من التقاة. غير أن ف. ر. مولتون (F. R. Moluton) بعد دراسته في شيء من العمق استنتج استحالته. وفي عام ١٩١٧ أعاد هارولد جيفريز (Harold Jeffreys) دراسة نفس الافتراض، وأشار إلى أنه بتأثير قوي المد، يمكن أن يكون القمر قد انفصل عن الأرض وهي في حالة منصهرة. وعلى كل،

ففي عام ١٩٣١ تناول جيفريز الموضوع من جديد واستنتج استحالة وقوع هذا الأمر. ومنذ ذلك الوقت يشاركه هذا الرأي معظم الفلكين.

ومع أن مولتون وجيفريز أوضحا أن انفصال انفصال القمر عن الأرض أمر بعيد الاحتمال، إلا أنهما وضعا نظريات للمجموعة الشمسية تتضمن أن الأرض وغيرها من الكواكب كانت قد انفصلت أصلاً عن الشمس. وقد اقترحا، هما وجيمس جينز (James Jeans) ت. س. تشمبرلن (T. C. Chamberlin) أن الكواكب قد تكونت من ترام المواد المتناثرة الناجمة عن مرور نجم بالقرب من الشمس أو تصادمه بها. وهذه الفكرة عن نشأة كواكب المجموعة الشمسية لا تزال يعتنقها الكثيرون حتى الآن.

وتدل الشواهد التي نحصل عليها بالمنظارات الفلكية الكبيرة، على أن معظم النجوم تتكون في مجموعات من نجمين أو ثلاثة أو أربعة نجوم. وقد أمكن تحديد وزن النجوم المركبة بتطبيق قوانين نيوتن للحركة وقانونه العام للجاذبية. كما أمكن معرفة سرعة هذه النجوم وذلك بدراسة التغيرات المميزة التي تطرأ على طيفها أو بالقياس الفعلي لحركتها بالنسبة للنجوم القريبة. وقد وجد أنه يندر أن تتساوى كتلتا النجمين في المجموعة الثنائية، وأن النسبة بين كتلتيهما تتغير تغيراً كبيراً. واستنتج جيرارد ب. كويبر (Gerard P Quiper) بجامعة شيكاغو أن عدد النجوم الثنائية لا يتوقف إطلاقًا على النسبة بين كتلة أحد النجمين وكتلة النجم الآخر، وبعبارة أخرى، فإن احتمال وجود نسبة معينة بين كتلتي نجمين أكثر من

وجود نسبة أخرى احتمال ضئيل جداً. ويبدو في الواقع أن فرصة وجود ازدواج تكون كتلة أحد نجميه ١/١٠٠٠ من كتلة النجم الآخر، هي نفس فرصة وجود ازدواج تكون نسبة الكتلتين لنجميه ٩٩٩/١٠٠٠.

وطبيعي أن يكون من العسير مشاهدة ازدواج نسبة كتلة نجمه الثانوي إلى كتلة النجم الأولى هي ١/١٠٠٠، وخاصة إذا كان هذا النجم الثانوي غير مضيء. وإذا اعتبرنا الشمس وأكبر كواكبها، وهو المشترى، نجماً مزدوجاً. فكتلة المشترى تقدر بجزء من ألف من كتلة الشمس، وهو يضيء فقط بضوء الشمس المنعكس عليه وأن المشترى لا يرى حتى من أقرب النجوم إليه وهناك من الدلائل الكثيرة ما تشير إلى أن وجود النجوم المزدوجة، مثل الشمس والمشترى، أمر عادي في المجرة. وتشير نفس الاعتبارات إلى احتمال وجود ما يقرب من ١٠٠ مليون مجموعة شمسية. وشيوع وجود هذه المجموعات الشمسية على هذا النطاق الواسع ينفي احتمال وجودها كنتيجة لتصادم بين نجمين.

ومنذ سنوات عديدة، لاحظ أ. أ. برنارد (E. E. Bernard) بمرصد «يركس» وجود بقع سوداء أمام الغيوم السديمية المنتشرة في المجرة. وقام بارت ج. بوك (Bart J. Bok) بجامعة هارفارد بفحص هذه الكرات الصغيرة المعتمة من الغبار والغاز؛ ووجود بوك أن كتلتها تناهز كتلة الشمس، وأن قطرها يقارب المسافة بين الشمس وأقرب النجوم إليها. وقد أوضح ليمان سبتزر (Lyman Spitzer) بجامعة برنستون أنه إذا وجدت الفضاء كتل كبيرة من الغبار والغاز فإن ضوء النجوم القريبة

منها كفيل بأن يدفعها تجاه بعضها البعض ومن ثم تتجمع جسيمات الغبار وتضغط ضعطاً كافياً يتيح الفرصة لقوة الجاذبية المسيطرة على الكتلة بأجمعها وعند ذلك يصبح الضغط والحرارة بداخلها كافيين لبدء التفاعلات الحرارية النووية للنجم.

ويبدو معقولاً أنه إذا تكون نجم الشمس نتيجة عملية من هذا النوع، فقد تتبقى مادة تكفي لبناء باقي المجموعة الشمسية.فإذا كانت العمليةأكثر تعقيداً، فقد يؤدي هذا إلى تكوين نجمين بدلاً من نجم واحد. فإذا اشتد تعقيد العملية فقد تنجم عنها مجموعة من ثلاثة نجوم أو أربعة. هذا القبيل من النظريات مقبول لدينا الآن أكثر من الافتراضات القائلة بأن الكواكب قد انفصلت بطريقة ما عن الشمس بعد أن تم تكوينها. وفي رأيي أن الافتراضات القديمة لم تكن مقنعة، لأنها حاولت تعليل مصدر الكواكب وأهملت تعليل مصدر الشمس ذاتها. وعندما تحاول أن نحدد كيف تكونت الشمس، فإننا ندرك على الفور كيف أن المواد التي تشتمل عليها الكواكب الآن هي من مخلفات مادة الشمس.

إن أي نظرية تفسر أصل المجموعة الشمسية، يجب أن تتضمن دليل ما نشاهده من كمية الحركة الزاوية للشمس في دورانها حول نفسها وللكواكب في دورانها حول الشمس. وتقدر كمية الحركة الزاوية لأي كوكب بحاصل ضرب كتلته × سرعته × بعده عن الشمس. وللكوكب المشترى أكبر قسط من كمية الحركة الزاوية في المجموعة الشمسية، أما نصيب الشمس نفسها فيعادل فقط ٢% من كمية حركة المجموعة والأمر

الآخر الذي لابد من اعتباره عند مناقشة أي نظرية هو ما يسمى بقانون «تيتاس – بود» (Titus – Bod Law) الذي يبين بطريقة رياضية مبسطة كيف تتناسب أبعاد الكواكب عن الشمس: فالكواكب القريبة من الشمس متقاربة كل من الأخرى، فالكواكب البعيدة عن الشمس متباعدة كل عن الأخرى، على أن هذا القانون تقريبي ولا ينطبق على واقع الأمر بدقة، وقد لا يستحق كل الاهتمام الذي أوليناه إياه. وفي دراستي للموضوع بحثت عن أدلة أخرى تتعلق بأصل المجموعة الشمسية.

منذ حوالي خمسة عشر عامًا، أشار كل من هنري نوريس راسل (Henry Norris Russel) بجامعة برنستون ودونالد هـ. مينزل (Donald H. Menzel) بجامعة هارفارد إلى وجود علاقة مذهلة بين نسب العناصر في جو الأرض ونسبها في أجواء النجوم بما فيها الشمس. فمن الجدير بالملاحظة أن عنصر النيون الغاز الذي نستخدمه في العلاقات الضوئية نادر الوجود في جو الأرض، لكنه كثير الانتشار نسبياً في أجواء النجوم. واستنتج راسل ومينزل أن النيون، وهو العنصر الذي لا يكون مركبات كيميائية، تسرب من الأرض وهي ساخنة في فترة مبكرة من تاريخها، وتسرب معه كل الماء والمواد المتطايرة التي كان الجو يتألف منها في ذلك الوقت. ويفترض راسل ومينزل أن المحيطات والجو الموجود حالياً تكونت بتسرب الأزوت والكربون والماء من جوف الأرض. وكذلك يفترض أستاذ الفيزياء الألماني ك. ف. فون فايستزكار (C. F. Von Weizsäcker) أن غاز الأرجون الموجود بالهواء قد نشأ غالباً من تحلل البوتاسيوم المشع خلال الأحقاب الجيولوجية، وأنه تسرب من باطن

الأرض. كذلك أشار ف. و. آستون (F. w. Aston) بجامعة كمبردج إلى أن الغازين الخاملين الآخرين الكريبتون والزينون قد تسربا من الأرض.

بمثل هذه الأفكار عن تسرب العناصر الكيميائية المتطايرة من سطح الأرض، بدأت دراستي الخاصة عن أصل الأرض. وعلى وجه التحديد، كيف ومتى تسربت هذه العناصر من الأرض؟

والنتيجة التي خلصت إليها هي أنه من المستحيل أن تكون هذه العناصر قد تسربت من الأرض بعد تمام تكوينها، فتطايرهالابد أن يكون قد حدث في تاريخ مبكر، إذ أن جاذبية الأرض بعد تمام تكوينها تحول دون تسرب الغازات المتطايرة إلى الفضاء. ولكن إذا كانت هذه الغازات قد تسربت من الأرض قبل تمام تكوينها فما هو مصدر الغازات التي نجدها اليوم على سطح الأرض؟ فالماء، على سبيل المثال، كان حرياً أن يتسرب مع النيون، ولكنه الآن يملأ المحيطات. ويبدو أن الجواب على ذلك هو أن من الخواص الكيميائية للماء أنه لا يكون مركبات متطايرة عند درجات الحرارة المنخفضة.

وعلى هذا، فإن الأرض إذا كانت في أي وقت مضى أبرد مما هي عليه الآن فلعلها كانت قد احتفظت في باطنها ببعض مائها، وأن يكون هذا الماء قد انبثق فيما بعد إلى سطحها. ولكن النيازك تحتوي على جرافيت وكربيد الحديد، وهذان يحتاج تكوينهما إلى درجة حرارة عالية.

فإذا افترضنا أن الأرض والكواكب الأخرى كانت باردة فكيف تم هذا التفاعل الكيميائي؟

كيف إذن تكونت الأرض والكواكب؟ إن أحداً منا لم يكن حاضراً وقتذاك، وأي افتراض أسوقه لا يسهل اعتباره ممثلاً للحقيقة المؤكدة. وغاية ما يمكن عمله في هذا الصدد هو أن نحدد نهجاً ممكنا لتسلسل الحوادث، بحيث لا يتعارض هذا النهج والقوانين الطبيعية والحقائق المشاهدة. ولا يمكننا حالياً أن نستنبط بطريقة رياضية بحتة التاريخ الدقيق الذي بدأ بكرات الغبار. ولما كان ذلك أمراً متعذراً علينا، فإنه لا يسعنا أن ننهج نهجاً قاطعاً في قبول أو استبعاد الخطوات المفترضة لتفسير نشأة الكواكب وتطورها. ومع كل، فقد يمكننا أن نبين أي الخطوات أكثر احتمالاً، وأيها بعيدة الاحتمال.

يعتقد كويبر أن الكتلة الأصلية للغبار والغاز قد انقسمت إلى جزء تكونت منه الشمس وأجزاء أخرى تكونت منها الكواكب، المشترى وزحل بغازاتهما بما في ذلك الغازين الخفيفين الايدروجين وفقدت الأوائل من الكواكب المسماة بالأرضية وهي عطارد والزهرة والأرض والمريخ غازاتها، واحتفظ الكوكبان العملاقان بالهيليوم. أما الكوكبان أورانوس ونبتون فقد فقدا جزءاً كبيراً من غازات الإيدروجين والهيليوم والميثان والنيون، ولكنهما احتفظا بالماء والنوشادر والمواد الأقل تطايراً. ويتفق كل ذلك مع الكثافة الحالية للكواكب.

ويبدو من المؤكد إلى حد معقول أن الماء والنوشادر والمواد الهيدروكربونية مثل الميثان، قد تكاثفت إلى حالة صلبة أو سائلة في أجزائها من هذه الكواكب الأول. ولابد أن يكون الغبار قد تخثر في عواصف جليدية انتشرت في مساحات تناهز المساحات الواقعة الآن بين الكواكب. وبعد مدة تكونت أجرام ضخمة مركبة من الماء والنوشادر والمواد الهيدروكربونية والحديد أو أكسيد الحديد. ولابد أن بعض هذه الأجرام كان يضارع القمر حجماً، وقد يكون القمر قد نشأ بهذه الطريقة. وتجمع جرم كبير في حجم القمر لابد وأن تتولد عنه حرارة كافية لتبخير مواده المتطايرة.أما الأجرام الأصغر حجماً فهي حرية أن تحتفظ بهذه المواد. ولاشك أن معظم الأجرام الصغيرة قد اندمجت في الأجرام الكبيرة. وقد يكون «ديموس»«وفوبوس»، قمرا المريخ، هما الباقيان من بين هذه الأجرام الصغيرة.

ولابد أن كتلاً ضخمة من الحديد قد تكونت أيضاً. فبالقرب من الحافة الشمالية للقمر يوجد سهل كبير يعرف ببحر «أمبريام»، تحيط به جبال تتخللها أخاديد عميقة طويلة، وقد يبدو أن الجزء بأجمعه قد اتخذ هذا الشكل نتيجة سقوط جسم قد يبلغ قطره ستين ميلاً. وأول من افترض ذلك هو العالم الجيولوجي الأمريكي ج. ك. جلبرت (G.K. Gilbert) في عام ١٨٩٣، وتبعه في هذا الرأي مؤخراً غيره من العلماء. وتقع بقعة التصادم جنوب«سينوس ايريدوم». ويستدل من توزيع الأخاديد والروابي حول مركز قرص القمر على أن الجسم المصطدم جاء من جهة «سينوس ايريدوم» وأحدث هذا خليجاً عند بقعة التصادم العميقة ناشراً

أجزاء من مادته على سطح القمر. وتبلغ المسافة بين نقطتي «سينوس ايريدوم» ١٤٠ ميلاً وذلك يدعم تقدير قطر الجسم بستين كيلاً. ولابد أن تكون الأخاديد قد نشأت بفعل مواد غاية في الصلابة أشبه بسبيكة من الحديد والنيكل وكانت مستقرة بداخل هذا الجسم. وبطبيعة الحال لا تزال بعض الأجسام الحديدية طافية في الفضاء الواقع بين الكواكب، يهوي بعدها فيصطدم بعضها بالأرض بين الحين والآخر، وتعرف بالنيازك.

كيف تكونت مثل هذه الأجسام المعدنية من سحابة الغبار الدقيق الأصلية؟ بالإضافة إلى الغبار تشتمل الكويكبات على كميات ضخمة من الغاز، معظمه من الأيدروجين. وقد افترضت أن الضغط الواقع على الغازات التي تحتويها الكويكبات المتقلصة، يولد حرارة عالية كفيلة بصهر السليكات، وهي المركبات التي تؤلف اليوم جزءاً كبيراً من القشرة الصخرية للكرة الأرضية. وتقوم نفس الحرارة العالية، في وجود الايدروجين، باختزال أكسيد الحديد إلى عنصر الحديد، فيرسب الحديد المنصهر، متخللاً السليكات، ومتجمعاً في برك كبيرة.

هذا الافتراض غير مقنع، إذ أنه من الضروري أن نعرف الطريقة التي فقدت بها الأرض بعض مادتها الصخرية، وذلك بالمقارنة بحديدها المعدني الكثيف. وهذا الأمر أكثر ضرورة في حالة الكوكب عطارد الذي لابد أن يحتوي على كمية من الحديد تتراوح ما بين ٦٠٪، ٧٠٪ من مادته، والواقع أن الكواكب الأرضية تختلف عموماً في تركيبها، فمثلاً يحتوي عطارد على أكبر نسبة من معدن الحديد المرتفع الكثافة، وتقل هذه النسبة

في حالة الأرض والزهرة، وتقل أكثر في المريخ، وتصبح ضئيلة جداً أو منعدمة في القمر. وليس من اليسير أن نفترض حلاً معقولاً يفسر لنا ميكانيكية تبخر المواد الصخرية التي لا تتطاير وكيفية انفصالها عن هذه الكواكب. وليس من المعقول أن نفترض أن الكوكب في بدء نشأته أمكنه الاحتفاظ بجزيئات الأيدروجين الخفيفة جداً في الوقت الذي فقد جسيمات السليكات الكبيرة جداً، ولاتحدث سوى تغيرات طفيفة فيما يحيط به من أحوال وظروف خارجية. وما يزيد الأمر تعقيداً أن عناصر أخرى تعتبر طيارة إلى حد ما، مثل الزئبق والزرنيخ، موجودة في الأرض وفي النيازك. والعملية، أياً كانت طبيعتها قد نتج عنها فقد بعض المواد التي لاتتطاير وبقاء مواد أخرى بعضها سهل التطاير.

ويسهل حل الموضوع إذا ثبت أن الشمس في الطور الملائم من تاريخ المجموعة الشمسية اشتدت إضاءتها اشتداداً كبيراً جداً لفترة وجيزة من الزمن جردت في أثنائها الكواكب الناشئة وقتئذ والمجموعة الشمسية نفسها من كل الغازات، وكذلك من مقادير مناسبة من صخور السليكات المتبخرة. وإذا كان هذا التوهج قد حدث لفترة قصيرة من الزمن فإن ذلك كفيل بأن يتبخر الجزء الخارجي من الكواكب ذات الأحجام الكبيرة بينما يظل باطنها بارداً محتفظاً بالنسبة الصحيحة لعناصره. ويمكن أن يحدث شيء من هذا القبيل لنجم جديد عندما يبدد طاقة جاذبيته في إحراق ما يحمله من الإيدروجين البدائي الثقيل محولاً إياه إلى هيليوم.

ويبدو لنا الآن أن النيازك كانت في وقت ما أجزاء من كواكب صغيرة تتحرك حول الشمس بين مداري المريخ والمشترى. وتركيب هذه الأجسام جدير بالملاحظة. فبعض النيازك الحديدية تحتوي على نوعين من سبائك الحديد والنيكل، تحتوي إحداهما على ٦ إلى ٧% من النيكل، وتحتوي الأخرى على أكثر من ١٥% من هذا المعدن. وترتيب هاتين السبيكتين إحداهما بالنسب للأخرى داخل النيزك المعدني ينم عن نمط يدل على أنهما تكونتا بالتبلور البطيء. ولابد أن يكون الحديد قد انصهر ثم برد ببطء، وأن عملية التبلور قد تمت بين درجتي ٣٠٠º، 500º مئوية. ومعظم النيازك صخرية أكثر منها معدنية. وأغلبها من نوع يسمى بالكوندريتات (Chondrites) وهذه عبارة عن خليط أجزاء من المعادن المتبلورة، وأجزاء أخرى من كل من نوعي سبيكتي الحديد والنيكل. وتحتوي الكوندريتات على أجسام عجيبة تسمى الكوندرولات (Chondroles) وهي ذات مظهر زجاجي، ومستديرة الشكل أو أحياناً كروية تقريباً. ولابد أن تكون قد تجمدت أثناء سقوطها تحت تأثير الجاذبية الأرضية دون عائق. والواضح أن الكوندريتات عبارة عن خليط يحتوي على مواد معدنية تكونت في مكان آخر قبل تجمعها في الخليط . ومن أنواع النيازك الصخرية الأكثر ندرة ما يعرف باسم الأكوندريتات (Achondrites) وهي لا تحتوي على كوندرولات، ولكنها على أي الحالات عبارة عن خليط متكتل.

ويدل تركيب النيازك على أنها تكونت بعد سلسلة من العمليات على النحو الآتي: بعد أن صهرت المادة الأولية اختزل أوكسيد الحديد إلى

عنصر الحديد، وفصل الحديد المصهور عن السليكات بتأثير مجال الجاذبية، ثم بعد ذلك تكونت بلورات السليكات وسبائك الحديد والنيكل خلال التبريد البطيء. ولكي ينشأ مجال لقوة الجاذبية ذو أثر فعال لابد وأن يكون حجم الجسم الذي تمت فيه هذه العمليات حجماً ملائماً، يبلغ قطره ٦٠ ميلاً أو أكثر. ونتيجة لتصادمات عنيفة، تحطمت هذه الأجسام وتكونت الكوندرولات وأجزاء البللورات وقطع المعدن، وتجمعت هذه فيما بعد مؤلفة الكوندريتات.

ويمكن الاستدلال على تاريخ وقوع هذه العمليات بثلاثة طرق مختلفة باستخدام المواد المشعة. وتعتمد الطريقة الأولى على انحلال عنصر الراديوم وتحوله إلى عنصر الرصاص. وتحدد هذه الوسيلة التاريخ الذي انفصلت فيه النيازك الصخرية والمعدنية بعملية الانصهار، وقد استدل على أنه يرجع إلى ٤,٥ بليون عام مضت. وتعتمد الطريقة الثانية على تحول عنصر الروبيديوم إلى أحد نظائر عنصر الاسترونشيوم، وتدل هذه الطريقة أيضاً على أنه قد مضى ٤,٥ بليون عام على انفصال عنصر الاسترنشيوم عن الروبيديوم الموجودين بالنيزك، وذلك أيضاً خلال عملية انصهار. وتعتمد الطريقة الثالثة على تولد عنصر الأرجون من أحد نظائر عنصر البوتاسيوم، وذلك في النيازك الكوندريتية، وهذه الطريقة تحدد الزمن الذي مضى على تسرب غاز الأرجون بالتسخين بمدة لا تتجاوز ٤,٣ بليون عام. والخطأ الممكن في هذه التقديرات الثلاثة يجيز اعتبار هذه الفترة متساوية. وعلى هذا يمكننا أن نقول أن النيازك قد تكونت منذ حوالي ٤,٥ بليون عام، وكان تكوينها خلال فترة تبلغ بضع مئات الملايين من

الأعوام أو أقل من ذلك. وواضح أنها تكونت أثناء تكون المجموعة الشمسية.

ويظن كويبر أن الغازات قد تسربت من الكواكب الأولى بتأثير الإشعاع الشمسي خلال حوالي مائة مليون عام. وإذا كانت المواد التي تجمعت فكونت الأرض أو التي كانت في الأصل في مادة النيازك قد تعرضت للتسخين هذه المدة الطويلة لكانت حرية أن تفقد بعض أجزائها السريعة التطاير. ولكن بعض المواد المتطايرة مثل الزرنيخ توجد على الأرض بل والنيازك أيضاً. وتلك الحقائق يسهل تفسيرها إذا افترضنا أن ما حدث هو عملية تسخين سريعة، أطاحت بالغازات وبجزء من السليكات المتطايرة الموجودة بالكواكب الأولى. والراجح أن عملية من هذا القبيل قد اتخذت سبيلها، واكتسبت المجموعة الشمسية الحديثة بعضاً من حفرياتها التي تكشف عن تاريخها القديم، مثل النيازك، وسطح القمر، وربما قمري المريخ.

ومنذ عهد قريب، أعيد تقدير كثافة القمر والكواكب المختلفة. وفيما يلي بعض هذه الكثافات، مقدرة عند ضغط منخفض. عطارد: ٥، الزهرة: ٤,٤، الأرض: ٤,٤، المريخ: ٣,٩٦، القمر: ٣,٣١. ومن الأفضل أن يفسر اختلاف الكثافة هنا على أنه اختلاف في نسبة تواجد الحديد في هذه الكواكب، وأن يتم هذا بدوره عن اختلاف كمية السليكات المتبخرة من كل منها. وواضح أن الكوكب الذي فقد كثيراً من سليكاته تزداد نسبة الحديد فيه عنها في الكوكب الذي فقد كمية أقل من

السليكات. ويجمع كل العلماء تقريباً على أن الأرض كانت كلها منصهرة عند تكونها، وأن الحديد قد غاص إلى مركز الكرة الأرضية في ذلك الوقت. هذه الفكرة سائدة وراسخة رسوخ القصص الشعبية، ومثلها في ذلك فكرة انشطار الأرض عن الشمس، وانشطار القمر عن الأرض. فهل بدأت الأرض حقاً سائلة؟ إن ن. ل. بوين (N. L. Bowen) وغيره من علماء الجيولوجيا قد صرحوا في مؤتمر الأكاديمية الأهلية للعلوم الذي عقد في رانشو سانتا في يناير عام ١٩٥٠ أن هذا الاحتمال يساوره الشك. وعللوا ذلك بأن الأرض لو كانت في مبدئها سائلة لترتب على ذلك وجود قدر من السليكات في أجزائها الخارجية أكبر مما نجده الآن.

ويرجع تاريخ نظرية الأرض السائلة إلى كلفن (Kelvin) الذي لم يجد تفسيراً لحرارة البراكين غير أنها جزء من الحرارة البدائية للأرض، وباكتشاف النشاط الإشعاعي كمصدر آخر للحرارة، لم يعد تفسير كلفن أمراً محتماً. غير أنه لا يمكننا أيضاً استبعاد إمكانية أن الأرض أصلاً مرتفعة الحرارة بسبب طاقة الجاذبية الناجمة عن تكونها عن طريق التجمع والتراكم أو بسبب الحرارة المتولدة عن النشاط الإشعاعي. فإذا كانت فترة تكونها قد استغرقت مدة لا تقل عن خمسة ملايين من السنين تقريباً، كان ذلك كفيلاً بصهرها في طور نشأتها. أما إذا تطلبت العملية فترة أطول كثيراً من هذه، تكونت الأرض عند درجة حرارة منخفضة، رغما عن الارتفاعات المؤقتة في درجة الحرارة، الناتجة عن تساقط العناصر الكوكبية الصلبة طيلة هذه الفترة.

وإذا كانت كمية النشاط الإشعاعي في المواد المتراكمة كبيرة إلى درجة كافية، فإنها تصهر الأرض الصلبة نفسها. وقد اقترح هذا التعليل لتفسير كيف بدأت الأرض في حالة منصهرة. وحتى الآن، لم تحدد بعد كمية العناصر المشعة في الأرض وفي غيرها من الأجرام الكوكبية والنيازك تحديداً دقيقاً.

ولكن الكميات الموجودة تقارب الكميات الحرجة اللازمة لإتمام عملية الانصهار. وقد كان هذا الموضوع محوراً لبعض الجدل والمعارضة. أما رأيي الشخصي فلم يصل بعد إلى مرتبة اليقين.

وهناك دليل آخر. فالمريخ، الذي يجب أن يماثل الأرض من بعض الوجوه، يحتوي وزناً على حوالي ٣٠% من الحديد والنيكل، ومع ذلك فنحن نعلم، بوسائل فلكية، أن التركيب الكيميائي للمريخ تركيب متجانس في كل أجزائه تقريباً. فإذا كان هذا صحيحاً، فإنه ينفي أن المريخ كان في الأصل منصهرًا. وتدل الندبات المشاهدة على سطح القمر على أن سبائك الحديد والنيكل كانت تتساقط عليه في نهاية مرحلة تكوينه. ونفس السبائك كانت تتساقط على الأرض ايضاً، إلا أنها كانت تتبخر بفعل الطاقة المتولدة من اصطدامها بجسم يكبرها كثيراً. ومع ذلك، فلو لم تكن الأرض منصهرة في ذلك الوقت، لأمكن العثور على بعض من سبائك النيكل والحديد في طبقات الأرض القريبة من السطح.

وإذا كانت طبقة الغلاف من الأرض تحتوي على الحديد، فلعل هذا الحديد يتحرك متسرباً نحو مركز الأرض، وتحركه على هذا النحو يغير من عزم القصور الذاتي للأرض. ويمكن أن نعرف عزم القصور الذاتي بأنه مجموع حاصل ضرب الكتلة عند كل نقطة من جسم الأرض × مربع بعد هذه النقطة عن محور دوران الأرض. فإذا كان الحديد يتحرك نحو مركز الأرض، فإن هذه الكمية سوف تتناقص ومن الخصائص الميكانيكية أنه إذا قل عزم القصور الذاتي للجسم الذي يدور فإن سرعة دورانه تزداد. ومن ثم، إذا كانت سرعة دوران الأرض في تزايد، فإن طول اليوم يتناقص.

وإنا لنعلم أن وحدة الزمن عندنا في تغير مستمر، ولكنها تتزايد ولا تتناقص. أي أن سرعة دوران الأرض تتناقص ولا تتزايد. وتدل المشاهدات الفلكية الدقيقة، والتي يرجع بعضها إلى رصد كسوفات وقعت منذ ٢٥٠٠ عاماً، على أن طول اليوم يتزايد بمعدل ١/١٠٠٠ أو ٢/١٠٠٠ من الثانية كل قرن. وكان من المعتقد أن التزايد في طول اليوم ناجم عن احتكاك المد الذي تسببه الشمس والقمر. ولكن إذا حاولنا التنبؤ بالتغيرات في الوضع الظاهري للقمر على أساس هذا المؤثر فحسب، لوجدنا اختلافًا بين حسابنا وبين الحقيقة المشاهدة. ومن جهة أخرى، إذا افترضنا أن الحديد يتحرك نحو مركز الأرض، لكان من شأن التغير في عزم القصور الذاتي أن يؤثر في طول اليوم كما بينت. والواقع، أنه لو وضعنا في اعتبارنا كلا العاملين، عامل المد وعامل الغتير في عزم القصور الذاتي، لاتفقت حساباتنا مع مشاهداتنا.

ولكي تتفق حساباتنا، لابد أن نسلم بأن ٥٠٠٠٠ ألف طن من الحديد تتسرب من الغلاف إلى نواة الأرض في كل ثانية. وبهذا المعدل تكون الفترة اللازمة لتكون النواة المعدنية للأرض هي ٥٠٠ مليون عام. وتشير بعض الحسابات إلى أن العملية قد تستغرق ٢ بليون عام. والمهم في الموضوع أن هذه الفترة الزمنية تناهز في الدرجة عمر الأرض، والمقدر لها على وجه العموم ٤,٥ بليون عام. وإذا كان هذا التعليل صحيحاً، فإن الأرض تكون قد وجدت أصلاً وبأجزائها الخارجية بعض الحديد، كما لعلها كانت منصهرة تماماً.

وقد تنعقد الأمور حينما يبرهن لنا والتر هـ. منك وروجر ريفيل بمعهد. سكريبس لعلوم البحار أن من المحتمل أن يكون عزم القصور الذاتي للأرض في تنتقص بسبب انتقال مياه المحيطات في بطء إلى القمم الثلجية في جرينلاند والمنطقة المتجمدة الجنوبية وأن هذه العملية يمكن أن تفسر تزايد طول اليوم دون افتراض تحرك الحديد نحو مركز الأرض، على الأقل ليس بالمعدل الذي توصلت إليه وذكرته من قبل، وعلى ضوء هذا الرأي لمنك وريفيل لا يكون لدينا في الواقع دليل على تحرك الحديد نحو مركز الأرض ومع كل، فدليلنا على الرأي المضاد نذر يسير. فالأمر لايزال مفتقراً إلى مشاهدات وأرصاد جديدة.

والآن نعاود في اختصار سرد تسلسل الحوادث الممكنة. امتدت سحابة ضخمة من الغبار والغاز في مكان خال في المجرة وتعرضت هذه للضغط الناشيء عن ضوء النجوم. وبعد ذلك تزايدت سرعة عملية

التراكم بتأثير قوى الجاذبية، وبطريقة ما، ولم تتضحْ لنا بعد، ثم تكونت الشمس، فأشعت ضوءاً وحرارة بالقدر الذي تشعه اليوم. وتولدت دوامات مضطربة من سحابة الغبار والغاز الهائمة حول الشمس، ومن هذه نشأت بداية الكواكب الحالية واحدة لكل كوكب، وربما واحدة أيضًا لكل من المخلفات الواقعة بين المريخ والمشترى. عند هذه المرحلة من العملية، تم تراكم الأجسام الكوكبية الكبيرة بواسطة تكاثف الماء والنوشادر. ومن بين هذه تميز الجسم الأساسي للقمر، وآخر أكبر لكوكب الأرض. وكانت درجة حرارة هذه الأجسام منخفضة في باديء أمرها، إلا أنها ارتفعت فيما بعد لدجة تصهر الحديد. وفي مرحلة البرودة تراكمت المياه في هذه الأجسام. وفي المرحلة الساخنة التي يمكن غزوها إلى ارتفاع كبير مؤقت في درجة حرارة الشمس، احتجز الفحم على صورة جرافيت، أو مركبات كربونية. وعندئذ تسربت الغازات واتحدت الكويكبات بفعل التصادم.

على هذا النحو، ربما تكونت الأرض.

ولكن ماذا حدث منذ ذلك الحين؟ لقد حدثت بالطبع أمور كثيرة، ومن بينها نشأة الهواء الجوي وتطوره. والمرجح أن الأرض، بعد اكتمال تكونها واستوت جسمًا صلبًا، كان يغلفها جو من بخار الماء والأزوت والميثان وبعض الإيدروجين وكميات ضئيلة من غازات أخرى.

أدلى ج. هـ. ج. بول (J. H. J. Poole) بجامعة دبلن باقتراحه الأساسي أن تسرب الإيدروجين من الأرض أدى إلى وجود الجو المؤكسد.

وما يحتويه الميثان (ك أ ٤) والنوشادر (ن أ ٣) من الإيدروجين قد يكون قد تسرت ببطء مخلفاً الأزوت وثاني أكسيد الكربون والماء وغاز الأوكسجين. وأنا أعتقد أن هذا هو ما حدث غير أن ظهور الأوكسجين لابد أن يكون سبقه ظهور كثير من الجزيئات الأخرى المحتوية على الإيدروجين والكربون والأزوت والأكسجين. وأخيراً دبت الحياة على سطح الأرض، كما بدأت عملية التمثيل الضوئي الأساسية، التي تمكن النباتات من تحويل ثاني أكسيد الكربون والماء إلى مواد غذائية وأوكسجين ثم بدأ تطور الهواء المؤكسد كما نعرفه اليوم. وحتى اليوم، لايزال التطور الطبيعي والكيميائي للأرض وجوهاً مستمراً.

القسم الثاني

الكرة الصخرية - النواة والغلاف

الجزء الأول: باطن الأرض

ك. أ. بولين

بعد أن أتم بولين دراسته الجامعية وتخصص في علم الرياضة بموطنه أوكلاند بنيوزيلاند، اتجه إلى دراسة الفيزياء الأرضية عام ١٩٣١ متأثراً بعاملين: الأول هو زلزال خليج هوك الذي وقع في شهر فبراري من ذلك العام، ويعتبر أكبر كارثة أصابت نيوزيلاند، والثاني هو سفره في بعثة إلى جامعة كمبردج، حيث التقى بالعالم السيسمولوجي الكبير السير هارلود جفري. وبعد عامين ونصف عام عاد بولين إلى أوكلاند وقد تخصص في علم السيسولوجيا. ولايزال يباشر عمله منذ عام ١٩٤٦ أستاذًا بجامعة سيدني بأوستراليا.

الجزء الثاني: حرارة الأرض.

أ. أ. بنفيلد

تخرج نفيلد من معهد «ماساشوشيتس»للعلوم التطبيقية عام ١٩٣٤ ثم سافر إلى جامعة كمبردج حيث حصل على درجة الدكتوراة في علم الفيزياء الأرضية. واشتغل فترة بالتدريس بكلية وليامز، ثم أدى واجبه العسكري أثناء الحرب بمعمل الأشعة التابع لمعهد ماساشوشيتس، وعين بعد ذلك بجامعة هارفارد حيث يشتغل الآن وظيفة أستاذ مساعد كما يقوم بالإشراف على المعامل الكهربائية بقسم العلوم التطبيقية.

الجزء الثالث: حرارة الأرض

س. ك. رانكورن

يشغل رانكورن منصب المدير المساعد للأبحاث بقسم المساحة والفيزياء الأرضية بجامعة كمبردج، وهو زميل بكلية «جونفيل وكايس». وقد بدأ اهتمامه بعلم الفيزياء الأرضية أثناء عمله مع ب. م. س. بلاكيت (P. M. S. Blackett) بجامعة مانشستر حيث حصل على درجة الدكتوراة. ويوجه رانكورن نشاطه واهتمامه الحاليين إلى دراسة مغناطيسية الصخور، وقد قضى فصول الصيف في الأعوام المنصرمة جامعاً عينات الصخور من سهول كولورادو ليستعين بها في دراساته لتحديد أعمارها من واقع خصائصها المغناطيسية.

باطن الأرض

ك. أ. بولين

تهتز الأرض بتأثير مايربو على عشرة زلازل كبرى في كل عام. والطاقة المنبعثة من أقل هذه الزلازل شدة تناهز الطاقة المنبعثة من ألف قنبلة ذرية. وتقدر طاقة زلزال اسام في أغسطس عام ١٩٥٠ بما يقرب من مائة قنبلة ذرية. وتنتقل الموجات الصادرة عن هذه الهزات خلال باطن الأرض بأجمعه بما في ذلك نواة الأرض فتتخذ مسارات منحنية وتتشكل حسب ما تخترقه من طبقات. وعلى هذا فإن موجات الزلازل تحكي لنا بعضاً من طبيعة الأرض التي تخترقها، وعندما تستقبلها محطاتنا السيسمولوجية على سطح الأرض، يمكننا أن نترجم ما تحكيه إلى صورة نستخلصها عن باطن الأرض، وكأني بالعالم السيسمولوجي وهو يمعن النظر فيما سجلته أجهزته في الظلام خلال قطعة من الزجاج، إنما يكشف عن باطن الأرض بجهاز أشعة سينية.

وقد ظفر علم السيسمولوجيا بمعلوماتنا عن باطن الأرض من طور التصورات المتخبطة إلى طور القياسات العلمية والاستنتاجات المبنية على أسس سليمة. ويرتبط هذا العلم بمعلوماتنا الجيولوجية عن الصخور السطحية، وبالتجارب العملية التي تجرى في المعامل على الصخور عند الضغوط العالية، وببعض مشاهدات فلكية معينة، وبذلك يمكننا أن نضع

أساساً لتفهم الحالات المنوعة السائدة عند الأغوار العميقة، طبقاتها الممتدة، وموادها، وخصائصها الطبيعية، والضغوط وما إلى ذلك.

وتعتبر دراسة الزلازل من العلوم الحديثة. ففي عام ١٧٥٠ نشرت مجلة Philosophysical Transactions التي تصدرها جمعية لندن الملكية، مقالاً لأحدث الكتاب في هذا الموضوع يعتذر فيه كاتبه إلى «هؤلاء الذي تضايقهم أية محاولة لتفسير الزلازل تفسيراً طبيعياً». غير أن هذا لم يمنعْ تراكم مشاهداتنا عن تأثير الزلازل، بحيث برز علم السيسمولوجيا في أواخر القرن التاسع عشر كعلم كمي حقيقي، عندما أنشأ جون ميلن (John Milne) الانجليزي في اليابان جهازاً لتسجيل الذبذبات الأرضية (السيسموجراف)، يصلح للإستعمال على نطاق عالمي. وقد أدخلت بعد ذلك تعديلات على هذا الجهاز، يرجع الفضل فيها على الأخص إلى أ. فيشارت (E. Wiechert) بألمانيا والأمير جاليتزين (Prince Galitzin) في روسيا، وحديثًا هوجوبنيوف (Hugo Benioff) بمعهد كاليفورنيا للعلوم التطبيقية.

أن انطلاق طاقة الإجهاد المرن (elastic-strain energy) عند المصدر أو «بؤرة»، الزلزال، يولد موجات تنتشر في جميع الاتجاهات بادئة من البؤرة. وفي عام ١٨٩٧ ميز العالم البريطاني ر. د. أولدهام (R. D. Oldham) في الخرائط السيسمولوجيا أنواعاً ثلاثة من الموجات السيسمولوجيا: (١) الموجات الأولية، وهي عبارة عن أمواج تخلخلية وتضاغطية كأمواج الصوت و(٢) الموجات الثانوية وهذه تتذبذب عمودية

على اتجاه انتقال الأمواج، مثلها في ذلك مثل أمواج الضوء و(٣) الموجات السطحية التي تظهر قرب السطح في طبقة سمكها حوالي ٢٠ ميلاً. وتنتقل الموجات الأولية خلال أجزاء الأرض الصلبة والسائلة، بينما تنتقل الموجات الثانوية خلال الطبقات فقط.

وتبلغ سرعة انطلاق الموجات الثانوية ثلثي انطلاق الموجات الأولية. وتتغير كلتا السرعتين بتغير عمقهما في الأرض. فأقصى سرعة لانتقال الموجات الأولية مثلاً هي ٨,٥ ميل في الثانية وذلك على عمق ١٨٠٠ ميل، وتهبط هذه السرعة إلى ثلاثة أميال في الثانية في الصخور القريبة من الأرض. وبسبب تغير السرعة، يميل مسار هذه الأمواج إلى الانحناء إلى أعلى. فعندما تقابل الموجات سطحاً يفصل طبقة عن أخرتنعكس هذه الموجات أو تنكسر، وعندما تصل إلى القشرة السطحية تنعكس ثانية إلى أسفل. وعند سطح الانفصال بين طبقتين تنشأ عن كل من الموجات الأولية أو الموجات الثانوية موجات أخرى أولية وثانوية. ومن ثم، فإن أي تسجيل سيسولوجي لزلزال معين قد يبين لنا بوضوح أطواراً تميز مراحل انتقال الموجات، والتغيرات التي طرأت على أشكالها.

بهذا الأسلوب من الاستدلال أثبت أولدهام في عام ١٩٠٦ أن للأرض نواة ضخمة تقع بداخلها وتتحد معها في المركز، كما أمكن بينوجوتنبرج (Beno Gutenberg) في عام ١٩١٤ أن يحدد موضع سطح النواة على عمق ١٨٠٠ ميل تحت سطح الأرض. وكان جوتنبرج في

هذا الوقت في ألمانيا. وبما أن نصف قطر الأرض يبلغ حوالي ٣٩٠٠ ميل، فإن نصف قطر النواة يبلغ حوالي ٢١٦٠ميلاً.

كان اكتشاف نواة الأرض نتيجة لرصد ما يسمى «بمناطق الظل» حيث يقل نسبياً ما يسجل من الموجات الأولية. ولنعتبر موجات أولية صادرة من زلزال كبير تقع بؤرته عند القطب الجنوبي. هذه الموجات يمكن رصدها في القطب الجنوبي من الكرة الأرضية، وأيضاً في النصف الشمالي حتى درجة ١٥ شمالاً (أي عند خط عرض جواتيمالا). ويندر استقبال الموجات الأولية في المنطقة ما بين خطي عرض ١٥ شمالاً، و٥٢ شمالاً، ولذلك تسمى بمنطقة الظل، أما الموجات التي تستقبلها أجهزة الرصد في المنطقة ما بين خط عرض ٥٢ شمالاً والقطب الشمالي فأثرها واضح جلي لشدتها. وتقع الولايات المتحدة بأكملها في منطقة الظل بالنسبة لمثل هذا الزلزال. وبالدراسة وجد أن مناطق الظل هذه مردها وجود نواة عند مركز الأرض، حيث تنجرف الموجات الأولية الآتية من أعلى انحرافاً حاداً إلى أسفل، وذلك شبيه بما يحدث لموجات الضوء الصادرة من عصاة مغمورة في الماء، إذ تنكسر هذه الموجات عند سطح الماء

تنحرف موجات الزلزال وتنعكس وهي في طريقها من مصدرها. وتمثل الخطوط الكاملة الموجات الابتدائية. كما تمثل الخطوط المتقطعة الموجات الثانوية الناشئة عن الانعكاس. وتنشأ منطقة الظل لأي موقع معين لبؤرة الزلزال من انعكاس الموجات وانكسارها عند النواة. والموجات

الأولية الوحيدة التي يمكن أن تصل إلى منطقة الظل هي تلك التي تنفذ داخل النواة وتنحرف انحرافاً حاداً.

كان من بين الأعمال العظيمة التي اضطلع بها السيسمولوجيون خلال الأربعين عاماً من هذا القرن أن وضعوا جداول يمكن الوثوق بها لمعرفة أوقات وصول الموجات الأولية والموجات الثانوية وهي في مختلف أوجه مساراتها. وفي عام ١٩٣٠، عندمت ساور السير هارلود جفري بجامعة كمبردج الشك في وجود أخطاء كبيرة بجداول «أزمنة الوصول» الموجودة وقتئذ، بدأ جفري سلسلة طويلة من الدراسات لتصحيح هذه الجداول. وقد اشترك مؤلف هذا الجزء من الكتاب مع جفري في هذا العمل من عام ١٩٣١ حتى عام ١٩٣٩.

وجداول جفري – بولين الموضوعة عام ١٩٤٠ تستعمل الآن على نطاق دولي. وتتفق هذه الجداول اتفاقاً كبيراً في أصولها مع «أزمنة الوصول» التي استنبطها في نفس الوقت تقريباً كل من جوتنبرج وتشارلزف. ريشتار (Charles Richter) بمعهد كاليفورنيا للعلوم التطبيقية. وهذه الجداول ذات أهمية قصوى للتعرف على التركيبات المختلفة لطبقات الأرض. وبواسطتها يمكن استنباط سرعة كل من الموجات الأولية والموجات الثانوية عند مختلف طبقات الكرة الأرضية. وبدراسة تغير السرعة مع العمق، يمكن لنا أن تتعرف على أعماق السطوح التي تفصل بين هذه الطبقات.

وباستخدام الجداول، توصل جفري بحساباته إلى أن عمق السطح الفاصل لنواة الأرض لا يختلف بأكثر من ثلاثة أو أربعة أميال عن تقدير جوتنبرج له بألف وثمانمائة ميل. وقد قدر أن الجزء الخارجي على الأقل من نواة الأرض منصهر، ولذلك لا تنفذ الموجات الثانوية خلالها. وهناك أدلة أخرى على ميوعة هذا الجزء، ومن بين هذه الأدلة البيانات عن تشوه شكل الأرض الصلبة بفعل عوامل المد، والبيانات الفلكية عن تحركات قطبي الأرض. وتدل حسابات هـ. تاكوتشي (H. Takeuchi) إذ تنكسر هذه الموجات عند سطح الماء «انظر الشكل (١)». المنطقة التي تغلفها.

واستخدام التعبيرين «صلب» و«مائع»، مرتبطين بالضغوط الهائلة والسائدة في باطن الأرض يكون في بعض الأحيان موضع التساؤل. وما يقصده عالم الفيزياء الأرضية بلفظ «صلب» في هذا الصدد هو أن خواص مرونة المادة التي تعنينا يمكن وصفها بمعادلات تناظر المعادلات التي نطبقها في الظروف المعتادة على المواد الصلبة العادية. وفي هذه المعادلات يرد استعمال معاملين: «معامل اللاانضغاطية» (Incompressibility) وهو مقياس مقاومة الجسم للضغط، و«معامل الصلابة» (Rigidity) ويعبر عن مقاومة الجسم للانفعال القصي (Shearing stress). سر كل من الموجات الأولية والموجات الثانوية عند مختلف للضغط، وهذا هو السبب في أن الموجات الثانوية لا تنفذ خلال الموائع.

والجزء من الأرض الذي يحيط بالنواة يسمى بالغلاف والمعروف الآن أن كل الغلاف صلب في أساسه (فيما عدا المحيطات وجيوب الحمم في المناطق البركانية)، وتنتقل كل من الموجات الأولية والموجات الثانوية خلال كل جزء من أجزاء الغلاف ولذلك اعتبرناه صلباً. وبينما كان العالم السيسمولوجي الكرواتي أ. موهوروفيتشيك (A. Mohoroicic) يدرس تسجيلاً سيسمولوجياً لزلزال حدث في البلقان عام ١٩٠٩ اكتشف وجود سطح انفصال هام، واقع على عمق ٢٠ ميلاً تحت سطح الأرض. وقد سمي باسمه وهو السطح الفاصل بين طبقة الغلاف والقشرة الأرضية، ولو أن تعبير «القشرة الأرضية» يحمل الآن معنى اصطلاحياً وتشير الأدلة السيسمولوجية إلى أن القشرة الأرضية ليست أكثر صلابة من المادة التي تقع أسفلها مباشرة.

ومن الناحية السيسمولوجية، تختلف القشرة عن الجزء الذي يليها من الغلاف في سرعة انتقال الموجات الأولية والثانوية فيها أقل منها في هذا الجزء، كما أن هذه السرعة أكثر تغيرًا في القشرة. وعدم انتظام السرعة هذا يجعل التعرف على التركيبات المختلفة لطبقات القشرة أمرًا عسيرًا، إلا أن العمل دائب في هذا السبيل بطرق شتى، كدراسة الموجات السطحية، ودراسة الموجات الأولية والثانوية المنبعثة من زلازل قريبة من محطة الرصد، والموجات المنبعثة من الانفجارات الكبيرة الصناعية بفعل الإنسان، كعملية تفجير الذخيرة التي تمت بجزيرة هليجولاند عام ١٩٤٧، أو باستخدام الديناميت في عمليات الرصد السيسمولوجي كما يحدث عند

التنقيب عن البترول. ومن نتائج الاكتشافات الهامة أن سمك القشرة يقل كثيراً تحت المحيطات عنه تحت القارات.

وقد تم التعرف حتى الآن على سبع مناطق أو طبقات متميزة في الأرض. ففي عام ١٩٣٦ اكتشفت مس أ. ليمان (Miss I. Lemann) الدانيماركية أن نواة الأرض ليست موحدة التركيب، بل يبدو أنها تتكون من جزءين مختلفين على الأقل. وبإمعان النظر ف الموجات الأولية الضئيلة نسبياً والتي نادراً ما تنبعث في منطقة الظل الواقعة على سطح الأرض، استنتجت «ليمان» احتمال وصول هذه الموجات بعد أن عانت انحرافاً حاداً إلى أعلى لدى مرورها في الجزء الداخلي من النواة حيث تكون سرعة انتقال الأمواج أكبر منها في الجزء الخارجي من النواة. وقد تأيد تفسيرها هذا بمشاهدات جوتنبرج وريشتار وجفري. ويقدر نصف قطر الجزء الداخلي من النواة حوالي ١٨٠٠ ميل، ويبلغ سمك الجزء الخارجي للنواة حوالي ١٣٠٠ ميل.

وقد قسم الكاتب جسم الأرض إلى سبع طبقات يرمز إليها بالأحرف أ، ب، ج، د، هـ، و، تتميز فيما بينها على أساس التغيرات في الكثافة. (أنظر شكل ٢) فالطبقة «أ» تمثل القشرة. وطبقة الغلاف تمثلها المناطق ب، ج، د، كما أن د مقسمة إلى منطقتين فرعيتين دَ، دً. ولا يزال هذا التقسيم في مرحلة الاختبار، نظراً لأن تقدير معدلات التغير في السرعة لا يزال مفتقراً إلى كثير من أوجه التثبيت من صحته. ويرمز إلى الجزء الخارجي من النواة بالرمز هـ، وإلى الجزء الداخلي بالرمز ز. وبين

هاتين الطبقتين يحد جفري طبقة أخرى و، يبلغ سمكها ٨٠ ميلاً، حيث تهبط سرعة الموجات الابتدائية فيها هبوطاً كبيراً. ولو أن جوتنبرج لم يكشفْ عن هذه الطبقة الأخيرة إلا أنه يقول أن البيانات حصل عليها لا تنفي احتمال وجودها.

ينقسم مقطع الأرض إلى طبقات تختلف سرعة انتقال الأمواج في كل منها عن الأخرى. يبين الجزء المظلل الجزء الخارجي من النواة، ويبين الجزء الأسود الجزء الداخلي من النواة. وتوجد فوارق كبيرة في السرعة بين النواة غلاف الأرض «الطبقات ب و ج و دَ وًَ»، توجد بين الجزءين الداخلي والخارجي من النواة. وتمثل الطبقة أ قشرة الأرض.

كيف يتسنى لنا أن نقدر الضغوط والخصائص الطبيعية للمادة عند الأعماق المختلفة في جسم الأرض؟ أن سرعات الموجات الأولية والثانوية تحددها الكثافة ومعامل الانضغاطية ومعامل الصلابة للمواد التي تخترقها الموجات، ولكن هذه السرعات لا تمدنا بالمعلومات الكافية لحل معادلات صحيحة لهذه المقادير. وعلى كل، فهناك طرق غير مباشرة تساعد على الوصول إلى تقديرات لها، ومنها: معلوماتنا عن كتلة الأرض، وعزم قصورها الذاتي، ومشاهداتنا في حقول التجارب، وتجاربنا في المعمل على الصخور، والنظريات الرياضية عن المرونة والجذب التناقلي.

بمثل هذه الوسائل قدر المؤلف أن كثافة الأرض تتزايد تدريجياً من ٣,٣ جم/سم^{٣} تحت القشرة مباشرة إلى ٥,٥ جم/ سم^{٣} عند أسفل الطبقة

الغلافية. ثم ترتفع الكثافة فجأة إلى ٩,٥ جم/سم^{٣} عند سطح النواة ثم تتزايد تدريجياً إلى ١١,٥جم/سم^{٣} عند قاع الطبقة الخارجية للنواة.

وقد حسبت علاقة تزايد الضغط بزادة العمق تحت سطح الأرض. ويبلغ الضغط عند قاع المحيط الهادي حوالي ٨٠٠ ضغطاً جوياً، وعند عمق ٢٠٠ ميل فقط تحت القشرة يصل الضغط إلى١٠٠,٠٠٠ضغطاً جوياً، وهو أعلى ضغط أمكن تحقيقه في المعمل (استخدم هذا الضغط في تجاربه على الصخور برسي و. بردجمان (Percy W. Bridgmann) بجامعة هارفارد). وعند سطح النواة مباشرة أي على عمق ١٨٠٠ ميل يصل الضغط إلى $^{١}/_{٣}$ ١ مليون ضغطاً جوياً، ويأخذ في الازدياد إلى حوالي أربعة ملايين ضغطاً جوياً عند مركز الأرض.

والحقيقة المدهشة التي أدت إليها النتائج هي أن معامل الصلابة لمادة الأرض في الغلاف تتزايد بازدياد العمق، إلى أن يصل عند سطح نواة الأرض إلى حوالي أربعة أمثال معامل صلابة معدن الصلب في الحالات العادية. وبعد ذلك، أي ف الطبقة الخارجية للنواة يهبط معامل الصلابة عمليًا إلى الصفر، مما يدل على أن هذا الجزء مائع.

ولعل أكبر فائدة أدت إليها هذه السلسة من الحسابات هي ما يتعلق بمعامل الانضغاطية. فبالرغم من التغيرات الحادة في الكثافة ومعامل الصلابة عند السطح الفاصل بين النواة والغلاف، فإنه، طبقاً للحسابات، لا يتغير معامل الانضغاطية كثيراً عند هذا السطح. وهذه النتائج قد حملت

المؤلف على أن يدرس نظرياً تأثير الضغوط العالية، من قبيل مليون ضغط جوي فأكثر، على المواد التي يحتمل وجودها في نواة الأرض. فإذا وضعنا في الاعتبار طائفة منوعة من الأدلة، لاستجبنا إمكان وضع حد لمعامل الانضغاطية للمواد الموجودة في نواة الأرض.

وباتباع هذا الأسلوب في الاستدلال، بيدو لنا أنه من المحتمل جداً أن يكون الجزء المركزي للنواة صلبًا وذلك بعكس جزئها الخارجي. هذا الرأي الذي ساقه المؤلف في عام ١٩٤٦، والذي تطور منذ ذلك الحين، يفسر تزايد سرعة الموجات الأولية لدى تغلغلها في الجزء المركزي للنواة. وتدل الحسابات على أن معامل مادة الجزء الداخلي للنواة يبلغ على الأقل ضعف معامل صلابة معدن الصلب عن الضغوط العادية.

وبنفس الأسلوب الاستدلالي، نستطيع تقدير كثافة الجزء المركزي للنواة الأمر الذي لم يكن ممكناً من قبل. والظاهر أن الكثافة عند مركز الأرض تقع بين ١٤ ١/٢، ١٨ جم / سم٣ غير أن هناك ما يشير إلى أن تزايد الكثافة بازدياد العمق في الجزء الداخلي للنواة (وعند قاع الطبقة الغلافية للأرض) يفوق المتوسط، الأمر الذي يفيد ضمناً أن هناك تغيراً ما يطرأ على تركيب هذه المنطقة.

من أي المواد تتركب الأرض عند أعماقها السحيقة؟ لقد كان هناك من الدلائل الوجيهة ما حملنا سنين طوالاً على الاعتقاد بأن جزءاً كبيراً من الأرض فيما تحت القشرة يتكون من صخور فوق قلوية من مادة شبيهة

بمادة معدن «الاوليفين» المعروف. أما المنطقة ج فيبدو أنها منطقة انتقالية، يتغير فيها التركيب، ربما من أحد الأشكال الهندسية للأوليفين إلى شكل آخر. وقد تتكون المنطقة د من عدة مواد معينة كالسليكا والمغنسيا وأوكسيد الحديد أما المنطقة د التي تحد طبقة الغلاف من أسفل فيحتمل أن تكون ذات تركيب متغير، إلا أنه لا يوجد حتى الآن اتفاق مرض عن ماهية المواد التي رسبت عند مثل هذه الأعماق.

أما تركيب النواة وهي الجزء الداخلي من الأرض، فقد كان مؤخراً محوراً لكثير من الجديد والمهم من أنواع الحدس والتخمين. فقد ساد طويلاً الافتراض أن معظم النواة يتركب من الحديد وسبائك الحديد والنيكل، وقد لقي هذا لفرض تأييداً من واقع نتائج تحليل النيازك التي يعتقد أنها أجزاء من كوكب متفجر شبيه بالأرض. غير أن و. كون (W. Kuhn) و أ. ريتمان (A.Rittmann) بألمانيا قد وضعا في عام ١٩٤١ نظريتهما الأساسية الي تفترض أن نواة الأرض تتكون من أيدروجين مضغوط. وصحيح أن هذه النظرية تتناقض مع بعض الاعتبارات الهامة، إلا أنها فتحت مجالاً للبحث مبنياً على فكرة أن المواد في المنطقة السفلى للطبقة الغلافية للأرض قد تتغير كثافتها تغيراً كبيراً وفجائياً بفعل الضغوط الكبيرة. وعلى هذا، فقد لا يتكون الجزء لخارجي من النواة من الحديدوالنيكل غير المتحدين، بل من أنواع مرتفعة الكثافة من الصخور الموجودة خارج النواة. تلك نظرية جدلية بحتة. وإذا قورنت الاحتمالات نجد أن الأدلة التي لدينا تجنح إلى تفضيل فرض وسط: ألا وهو أن الجزء الخارجي للنواة يتكون من كل من الحديد غير المتحد ومن مادة أخرى في عددها الذري.

ومن المظاهر الهامة للنظرية الجديدة أنها تساعد قبول فكرة أن كوكب المرخ والزهرة وعطارد والأرض تتماثل جميعاً في تركيبها الأولي العام. وقد أوضح «جفري» أن الأرض لا يمكن أن تتركب من نفس مواد الكواكب الأخرى إذا كانت مركبات نواة الأرض تختلف اختلافًا تامًا عن تركيب غلافها وطبقًا لحسابات و. هز رامزي (W. H. Ramsey) البريطاني والمؤلف، فإن كتلتي كوكبي المريخ والزهرة، وقطريهما، وكذلك التسطح المشاهد في ككوكب المريخ، كل هذا يمكن أن يفسر تفسيرًا مقبولاً إذا افترضنا هذين الكوكبين يتركبان من نفس المواد الأرضية. بعد تأثرها بعامل زيادة الضغط مع العمق.

أما عن الجزء المركزي للنواة، فيحتمل أن يكون مركباً من النيكل والحديد، وربما كذلك من بعض المواد الأكثر كثافة.

أما تقديراتنا لدرجات الحرارة في باطن الأرض، فنحن أقل تأكيداً منها عن تقديراتنا للضغوط. ففي المناجم العميقة تزاد درجة الحرارة بمعدل ٣٠ درجة مئوية لكل ميل كلما تعمقنا في المنجم. ولو استمرت الزيادة بهذا المعدل لزادت درجة الحرارة عن ١٠٠,٠٠٠ درجة عند مركز الأرض. والواقع أنه أصبح من المؤكد عمليًا أن معدل الزيادة في درجة الحرارة يقل عند الأعماق عن المعدل المذكور. وتدل التقديرات الحالية على أن درجة الحرارة عند مركز الأرض لا تتجاوز ٢٠٠٠ إلى ٦٥٠٠ درجة. وعلى كل، فالواضح جداً أن الارتفاع في الحرارة في باطن الأرض يتضاءل كثيراً إزاء الارتفاع في الضغط.

حرارة الأرض

أ. أ. بنفيلد

عندما يفحص الطبيب مريضاً فإنه يهتم بمعرفة درجة حرارته. ودرجة الحرارة، مع غيرها من الاختبارات، تساعد الطبيب على فهم ما يجري داخل جسم المريض، وكذلك يأمل الجيوفيزيائي أن يحصل على بعض القرائن التي تهديه إلى ما يجري بداخل الأرض، وذلك بقياس درجة حرارتها. وطبيعي أن مهمة الجيوفيزيائي هي في هذا الصدد أشق كثيراً من مهمة الطبيب، لأن الأرض، بعكس الإنسان، لا تملك منظماً ذاتياً يوحد درجة حرارتها، كما أنه لايمكننا أن ندخل مقياساً للحرارة إلى أعمق من الجزء الخارجي من القشرة الأرضية. وخير ما تستطيع عمله هو أن نقيس درجة الحرارة في آبار الزيت العميقة، وفي المناجم، وفي أنفاق السكك الحديدية، وغير ذلك، وهذه جميعًا لا تتعمق في القشرة السطحية إلى أكثر من بضعة آلاف من الأقدام. وأكبر عمق وصل إليه الإنسان في حفر الآبار هو أربعة أميال تقريباً. ونحن لا نعدو الصواب إذا قلنا أننا سنتمكن من الطيران إلى أجواز الفضاء الواقع بين مجموعتنا الشمسية، والوصول إلى أحد الكواكب المجاورة لنا، وأنه سيمضي بعد ذلك وقت طويل قبل أن نهتدي إلى سبيل ننفذ به إلى مركز كوكبنا، الذي يقع على عمق ٤٠٠٠ ميل.

ومع كل، فبالرغم من ضآلة معلوماتنا عن حرارة الأرض فإننا نفيد من الضئيل الذي نعلمه. وللموضوع بالطبع أوجهه الاستغلالية. فمنذ

آلاف السنين أدرك إنسان ما قبل التاريخ أن عليه ألا يقترب كثيراً من البركان الثائر، كما تعلم أن يستعمل ينابيع المياه الدافئة في الاستحمام وفي الأغراض الطبية. وفي «ريكجافيك» عاصمة ايسلاند البركانية، تدفأ المكاتب والمنازل الآن بمياه ساخنة طبيعية تجلبها الأنابيب من جوف الأرض. ويولي المهندسونفي أنحاء أخرى اهتماماً كبيراً إلى إمكانية استعمال المضخات الحرارية في تدفئة المنازل شتاءً وتبريدها صيفاً، وذلك بأن تنقل تلك المضخات الحرارة من الأرض إلى المنازل وبالعكس. وتساعد دراسة الحرارة عند الأعماق في التنقيب عن البترول وإنتاجه. أما في المناجم العميقة جداً مثل مناجم الذهب بجنوب إفريقيا فإن ارتفاع الحرارة يمثل إشكالاً خطيراً، ولابد من توفير وسائل لتخفيض درجة الحرارة تخفيضاً كافياً يمكن العمال من البقاء والعمل داخل المناجم.

واهتماماً بحرارة الأرض هو نفس اهتمام الطبيب بحرارة المريض، إننا نسعى لمعرفة ما يمكن أن تنبئنا به عن باطن الأرض الذي لا يمكننا أن نسبر غوره بأنفسنا، مما يمكننا من أن ندرك كيف تكونت الجبال، وماذا يثير البراكين، وكيف نشأ المجال المغناطيسي الأرضي، ولماذا غورت المحيطات حيث هي الآن، وغير ذلك من الأمرو المثيرة التي طالما شغلت أذهان أساتذة الفيزياء الأرضية.

والمعروف منذ سنوات عديدة أن درجة حرارة الأرض ترتفع باطراد كلما تعمقنا تحت سطح الأرض. وطبيعي أن هذا لا ينطبق على بضع عشرات الأقدام القليلة السطحية إذ نحس بالبرودة لدى نزولنا في أحد أيام

الربيع الدافئة إلى حجرة تحت سطح الأرض، حيث لا تزال الأرض محتفظة ببعض برودة الشتاء السابق. غير أنه عند أكثر من ٥٠ قدمًا تحت السطح يندر أن نحس بأثر التغير الموسمي في درجة الحرارة. وتحت هذا العمق، تستمر الحرارة في الارتفاع التدريجي، وتصل إلى درجة غليان الماء عند قاع بعض آبار الزيت العميقة بكاليفورنيا وغيرها من الأماكن.

لماذا ترتفع الحرارة دائماً بازدياد العمق؟ الإجابات على هذا السؤال متعددة كما يبين ذلك هارولد يوري في الجزء الأول من هذا الكتاب. والرأي المأثور هو أن الأرض نشأت جسماً ساخناً، وأنها لا تزال تحتفظ في جوفها بجزء كبير من حرارتها الابتدائية. ومن السهل أن نفهم كيف يحدث هذا إذا سلمنا بأن الأرض كانت جزءاً من الشمس أو قطعة من كوكب ما وافصلت عنه نتيجة اقتراب نجمين أو أكثر كل من الآخر اقتراباً كبيراً. وهناك نظرية أخرى تعرف بنظرية «سحابة الغبار»، وتنص على أن الأرض تكونت نتيجة اندماج تدريجي بخليط بارد من الغبار والغازات والجسيمات الصغيرة في الفضاء الواقع بين النجوم. والكواكب إذا نما بهذه الطريقة خليق بأن ينتهي بسطح ساخن نتيجة انصهار وتبخر الجسيمات المتساقطة عليه بسرعة عند الاصطدام به في مرحلة تمام نموه. وفي نفس الوقت سيكون باطن الكوكب قد سخن بسبب تضاغطه تحت ثقل المواد المتزايدة والمتراكمة على سطحه وغير ذلك من الأسباب، غير أنه من الممكن أن يكون هذا الارتفاع في درجة حرارة باطنه غير كاف لصهره.

ومع كل، فنحن لا يمكننا أن نتأكد من أن الأرض كانت ساخنة جداً وقت تكونها. واستناداً إلى ما نشاهده من كثرة العناصر الموجودة بقشرة الأرض، فقد وضع يوري مؤخراً نظريته القائلة باحتمال أن تكون الأرض قد تكونت عند درجة حرارة منخفضة نسبياً. ومن سبق الحوادث أن تنكهن بالأثر الذي ستحدثه هذه النظرية في آرائنا لكن من الممكن أن تتمخض مناقشة هذه النظرية عن توضيح بعض معتقداتنا عن درجة حرارة الأرض، وماضي تاريخها، وتركيبها. على أي حال فمن الواجب أن نضع في اعتبارنا أنه من الممكن ألا تكون حرارة قشرة الأرض آخذة في التناقص، بل أن تكون على عكس ذلك آخذة في الارتفاع.

تتمثل الصعوبة الأساسية في تقدير درجة حرارة باطن الأرض في كوننا غير قادرين على أن ننفذ إلى أعماق باطنها كي نقيس هذه الحرارة. ولو تيسر لنا ذلك فقد نجد من المعلومات ما يمكننا من البت في النظريات المتعلقة بأصل الأرض، أيها صحيحة وأيها جانبها الصواب. وبالطبع يمكننا دراسة درجة حرارة الحمم البركانية المنصهرة، ولكننا لا نعلم كم انخفضت حرارتها وهي في طريقها إلى فوهة البركان، كما أننا لانعلم من أي عمق أتت. وكان الاعتقاد السائد أن هذه تنبع من مواضيع قريبة من السطح، غير أنه افترض حديثاً أنها تأتي من أعماق كبيرة في باطن الأرض.

نحن نعلم أن معدل ارتفاع درجة الحرارة تبعاً للعمق، والذي نسميه «التدرج الحراري» يختلف من مكان لآخر، على سطح الكرة الأرضية. وليس هذا صحيحاً بالنسبة للمناطق البركانية ومناطق الينابيع الحارة حيث

لا تتوقع اختلافاً كبيراً عن «المألوف» فحسب، بل أنه صحيح أيضاً بالنسبة للمناطق الهادئة البعيدة عن النشاط البركاني. ويتفاوت التدرج الحراري في المناطق الهادئة كذلك ما بين أقل من ١٠° إلى ٥٠ درجة مئوية لكل عمق مقداره كيلو متر. وفضلاً عن ذلك فإن التدرج الحراري في المنطقة الواحدة ليس منتظماً على الدوام، ولكنه قد يتغير تغيراً مفاجئاً عند عمق معين، فمثلاً في بعض الآبار الواقعة في تشيشاير بانجلترا نجد أن التدرج الحراري يتغير طفرة إلى الضعف عند عمق معين.

ما سبب هذه التغيرات في التدرج الحراري من مكان إلى آخر؟ من بين التفسيرات أن كميات الحرارة التيتسري من الأعماق تختلف من مكان إلى آخر، وهذا التفسير صحيح جزئياً على وجه التأكيد فنحن نعلم الآن، على كل حال، أن التغير في التدرج الحراري عند المناطق الهادئة يرجع أساساً إلى اختلاف معامل التوصيل الحراري لطبقات الصخور عند كل مكان. وهذا يفسر أيضاً التغير في التدرج الحراري من عمق إلى آخر في حالة ما إذا كان التصيل الحراري لإحدى الطبقات الصخرية أجود منه للطبقة الأخرى، وتتوقف كمية الحرارة التي يوصلها الجسم الصلب على حاصل ضرب التدرج الحراري خلال الجسم × معامل توصيله الحراري.

وفي خلال الاثنى عشر عاماً الأخيرة أجريت التجارب على عينات من صخور الآبار والمناجم والأنفاق الكائنةفي مناطق هادئة بجنوب افريقيا وانجلترا وإيران والولايات المتحدة، وقد دلتْ المشاهدات على أن التدرج الحراري يميل إلى الانخفاض كلما كان معامل التوصيل الحراري للصخور

كبيرًا، والعكس صحيح، بحيث حاصل ضرب هذين المقدارين يساوي مقداراً ثابتاً. وفيما عدا مساحات معينة، مثل الحدائق الوطنية في بللوستون حذيث تؤدي بعض الاضطرابات المحلية إلى ارتفاع درجة الحرارة قرب السطح، فإنه يبدو أن كمية الحرارة المنبعثة من باطن الأرض قد تكون متساوية في كل من سطوح القارات. ومع كل، فالمساحة التي اختبرت من سطح الأرض ضئيلة جدًا، وقد يسفر المستقبل عن العثور على انحرافات أقليمية.

أما عن كمية الحرارة التي تسري من باطن الأرض إلى قاع المحيطات فلا نعلم عنها كثيراً، غير أن هانز بيترسون (Hans Pettresson) السويدي وأ. س بولارد (E. C. Bullard) الانجليزي قد شرعا في عمل بعض القياسات اللازمة، ولن يمضي وقت طويل قبل أن نحصل على بعض المعلومات في هذا الصدد. ولما كان الماء يغطي ثلاثة أرباع سطح الأرض تقريباً، فمن الواضح أننا في حاجة إلى الكثير من المعلومات قبل أن نبدأ في تقدير كمية الحرارة الإجمالية المنبعثة من باطن الأرض.

والذي نعلمه على وجه اليقين أن كمية الحرارة المنبعثة من الأرض عن وحدة المساحات من سطحها ضئيلة جداً. وفيما عدا أماكن الظواهر الخاصة كالبراكين والينابيع الحارة، تنتقل الحرارة بمعدل حوالي جزء من مليون من السعر في الثانية لكل سم^{2} من سطح الأرض، وذلك على سطوح القارات حيث تم قياس هذه الكمية من الحرارة. وتقل هذه الكمية ببضع آلاف المرات عن متوسط كمية الحرارة التي تصل من الشمس كل

سم[٢] من سطح الأرض. وواضح أن طقسنا وحرارة جونا تتوقفان على الشمس دون الحرارة الباطنية للأرض.

يحتمل أن معظم الحرارة التي نستبين تسربها إلى السطح لا تنتقل إليه إطلاقاً من نواة الأرض الساخنة، ولكنها تتولد في القشرة الأرضية. وقد نشأت هذه الفكرة عقب اكتشاف المواد ذات النشاط الإشعاعي، وجاءت مؤيدة للرأي القائل بأنه من الممكن أن تكون درجة حرارة الأرض في تزايد مستمر وليست في تناقص، وذلك فضلاً عن أن هذه الفكرة قد حملتنا على مراجعة آرائنا عن عمر الأرض (وهو الذي قدره اللورد كلفن الراحل بعشرين مليون عام على أساس ما افترض من معدل تناقص درجة حرارة الأرض منذ بدأت وهي في حالة انصهار).

ونحن نعلم الآن أن كميات صغيرة من الحرارة تتولد باستمرار في كل الصخور العادية وذلك نتيجة تحلل عناصر الراديوم واليورانيوم والثوريوم والبوتاسيوم وغيرها من الذرات المشعة التي قد توجد بتلك الصخور. ويظهر النشاط الإشعاعي قوياً في الصخور الجرانيتية على وجه الخصوص، وهي الصخور التي تكون جزءًا كبيرًا من مادة القارات. والمعتقد أن سمك الطبقة الجرانيتية في القارات يبلغ في المتوسط حوالي ستة أميال (انظر الجزء الخاص بقشرة الأرض). ونصف كمية الحرارة التي تنساب من باطن الأرض إلى سطحها قد يرجع إلى الحرارة المتولدة عن النشط الطبيعي الذي يحدث في مثل هذه الطبقة من الجرانيت.

وفي المناطق الجبلية حيث يحتمل أن تكون الطبقة الجرانيتية أكثر انضغاطًا وأكبر سمكًا، يجب أن تكون كمية الحرارة أكبر منها في السهول المنخفضة، وفي العام الماضي أيد هذا الفرض الأستاذ الفيزياء الأرضية فرانسيس برش (Francis Birch) بجامعة هارفارد، بعد أن تبين له من تجاربه أن كميات الحرارة الداخلية التي تنساب في منطقة جبال كلورادو تزيد بحوالي ٦٠% عن التقدر المعتاد.

وإلى هذه الحرارة المتولدة في الجرانيت يجب أن نضيف الحرارة المتولدة في الصخور البازالتية المحتمل وجودها تحت القارات والمحيطات. وسرعة تولد الحرارة بالنشاط الإشعاعي في حجم معين من الصخور البازالتية يقدر بنصف أو ثلث سرعة تولدها في نفس الحجم من الصخور الجرانيتية، غير أنه من المعتقد أن الطبقة البازالتية تبلغ في السمك ضعف الطبقة الجرانيتية التي تعلوها تحت سطح القارات. ونحن، ومع كل، لسنا متأكدين تمامًا من صحة افتراض وجود هاتين الطبقتين من الجرانيت والبازالت أو من كمية نشاطهما الإشعاعي. كما أنانا لا نستطيع الجزم بحالة النشاط الإشعاعي في باطن الأرض، رغم أن لدينا في النيازك دليلاً يحملنا على الاعتقاد بأن لهذا الباطن نشاطًا إشعاعيًا، إذ يعتقد البعض بأن هذه النيازك أجزاء من كوكب متحطمز (وبهذه المناسبة يعتبر افتقارنا إلى معرفة كمية النشاط الإشعاعي بباطن الأرض سبباً آخر هاماً لتعذر تقديرنا لدرجة حرارته). ويبدو على كل حال أن معدل توليد الحرارة بالنشاط في الأرض أكبر من معدل ما يتسرب من حرارة الأرض إلى الفضاء فإذا كان هذا صحيحاً فمعناه أن

درجة حرارة الأرض في تزايد تدريجي، ولكنه تزايد بطيء لا يحملنا على القلق من هذه الناحية.

وهناك افتراض بأن حرارة البراكن ترجع إلى النشاط الإشعاعي غير أن هذا أمر بعيد الاحتمال لضآلة ما نشاهده من النشاط الإشعاعي لمواد الحمم البركانية. ومع كل، فقد افترض بولارد حديثاً وجود مواد ذات نشاط إشعاعي في نواة الأرض السائلة إليها تعزي ظاهرة «الحمل» التي تتجلى في النواة، تلك الظاهرة التي اتخذها رانكورن كما أوضح في مقالة عن مغناطيسية الأرض في هذا الكتاب أساساً لتفسير العملية الميكانيكة التي ينشأ عنها المجال المغناطيسي لكوكب الأرض.

وقد يوجد بالطبقة الغلافية من جسم الأرض نوع آخر من تيارات الحمل شديد البطء تتوالى في فترات متقطعة. والمقصود بالطبقة الغلافية كما هو مبين بالشكل (٢) وهو القطاع الواقع بين القشرة والنواة، والذي يبلغ سمكه ٢٠٠٠ ميل. والطبقة الغلافية مثل الأجسام الصلبة من حيث انتقال أمواج الزلازل، غير أنها من المحتمل أن تكون أكثر شبهًا بسائل كثيف لزج منها بجسم بلوري صلب. وقد اقترح د. ت جريجر (D. T. Griggs) بجامعة كاليفورنيا وآخرون أن تكين السلاسل الجبلية يعود إلى تيارات الحمل التي تسري بالطبقة الغلافية من جسم الأرض، وكذلك قد يعود إليها وجود بعض شواذ معينة في ظواهر الجاذبية مرتبطة ببعض أعماق المحيط.

وفحوى النظرية هو أن جزء الطبقة الغلافية القريب من نواة الأرض قد يتسدد بالتسخين، فتقل كثافته ويرتفع إلى أعلى، فتندفع المواد الباردة المجاورة لتحل محله، وبهذا تبدأ في الطبقة الغلافية «خلية حمل» (أنظر شكل ٣) وقد تسحب تيارات الحمل عند قاع القشرة جزءاً منها إلى أسفل يتخلف عنها تجويف، يمتليء بالطبقات الرسوبية الخفيفة. وهذا قد يفسر النقص العجيب الذي يلازم الجاذبية فوق بعض أجزاء المحيطات. (أنظر الجزء الخاص عن «أخاديد المحيط الهادي»). وفي النهاية، فإن تيار الحمل قد يرفع إلى أعلى كميات كافية من المواد الساخنة، فتستقر الخلية وينقطع التيار نفسه، وبهذا تختفي القوة التي تجذب هذا من القشرة إلى أسفل. فيندفع مرتداً إلى أعلى، كما يحدث لقطعة الثلج عند غمرها في الماء ثم إطلاق سراحها لتطفو على السطح وتبعاً لهذه النظرية، فإن المادة التي ترتفع طافية قد تكون سلسلة من الجبال.

من المقترح أن تيارات الحمل المحتمل وجودها بالطبقة الغلافية من الأرض هي السبب في عملية تكوين الجبال والشكل بين المراحل الثلاثة للعملية ويمكن الكشف عن وجود هذه التيارات بقياس الحرارة المنبعثة من الأرض بالقرب من سلاسل الجبال الحديثة.

وهناك وسيلة لاختيار نظرية وجود تيارات الحمل في المنطقة الغلافية من الأرض. فإذا كانت هذه التيارات موجودة حقًا، وأنها تدفع بالمواد الساخنة نسبياً إلى أعلى الطبقة الغلافية، فإن انتقال الحرارة إلى سطح الأرض عند هذا الجزء يكون أكثر من المعتاد ومن الناحية الجيولوجية،

يكون المناسب لهذا الاختبار هو بالقرب من سلسلة جبال حديثة، حيث تكون تيارات الحمل قد توقفت حديثاً عن السريان. وقد أجرى اختبار من هذا النوع في كاليفورنيا، واتضح فعلاً أن معدل انتقال الحرارة إلى السطح يزيد بمقدار ٢٠% عن المعدل العادي. غير أن الأمر لا يزال مفتقراً إلى قيايات أخرى كثيرة، وحتى إذا أجريت هذه القياسات. فإن وجود معدل مرتفع لانتقال الحرارة لن يكون برهاناً قاطعاً للنظرية، إذ أن من السهل تعليل هذه الظاهرة على أسس أخرى.

ومن أبرز الحقائق عن حرارة الأرض أنها تنتقل في التربة والصخور ببطء شديد جداً، ويبدو أن درجات الحرارة تظل ثابتة زمناً طويلاً، فالتغيرات اليومية التي تطرأ على درجة حرارة الجو يصعب أن نجد لها أثراً على عمق قدم أو قدمين تحت السطح ويندر أن يؤثر حر اليوم أو برودته على طبقة الأرض عند هذا العمق بأكثر من درجة واحدة مئوية. ويصل هذا التأثير إلى ذلك العمق بعد يوم أو نصف يوم على حسب درجة توصيل التربة. أما الطبقات عند عمق بضعة أقدام من السطح فلا يؤثر عليها سوى التغيرات الموسمية الطويلة المدى، ويستغرق وصول أثر هذه التغيرات إلى ذلك العمق بضعة أشهر حتى أننا لنجد الصخور عند هذا العمق أبرد ما يمكن في منتصف فصل الصيف، ونجدها أدفأ ما يمكن في منتصف فصل الشتاء. ويصل أثر التغيرات الموسمية إلى عمق ٥٠ قدماً بعد فترة تناهز عاماً كاملاً، ويكون التغير في درجات الحرارة عند هذا العمق ضئيلاً. والذين يعرفون خواص الكهرباء عند الترددات العالية يألفون هذا

التاثير على أنه «تأثير سطحي» حراري، ذو أبعاد غريبة تكاد تكون خيالية.

أما عن ثبوت درجة الحرارة لمدة طويلة فإن برد العصر الجليدي الأخير، والذي انقضى عليه ٢٠,٠٠٠ عام تقريبًا، لا يزال أثره محسوساً بوضوح عند عمق بضعة آلاف قليلة من الأقدام. وقد أوضح «فرانسيس برش» مؤخرًا أنه يجدر بنا عند قياس انتقال الحرارة في الآبار العميقة أن نأخذ في اعتبارنا الفترة الطويلة للطقس البارد التي يعتقد أنها استغرقت حوالي ١٠٠,٠٠٠ عام عند بداية «العصر الحديث» (Pleistocene Period) منذ مليون عام مضت.

وفي الحقيقة، نجد أن توصيل الأرض للحرارة من البطء بحيث أن الثلاثة بلايين عاماً من عمر الأرض لم تكن كافية لكي تنقل بطريق التوصيل إلى السطح كميات كبيرة من حرارة النشاط الاشعاعي الممكن تولدها تحت أعماق تربو كثيراً عن ٢٠٠ ميل. وقد أشار ل. ب. سلشتر (L. B. Slichter) بجامعة كاليفورنيا أن حرارة النشاط الإشعاعي المتولدة عند هذه الأعماق لا تزال متراكمة وأنها لم تجدْ بعد الوقت الكافي لكي تصل إلينا، ولهذا لا يمكننا أن نحس بها عند السطح، وطبيعي أننا بعد قليل من بلايين الأعوام ستكون لدينا فكرة أوضح عن هذا الوضع.

وفي هذه الأثناء، يستطيع هؤلاء الذين لم يوهبوا صبراً خارقاً للعادة أن يجدوا في قياسات انتقال الحرارة في الأرض عوناً على تشخيص حالتها.

ورغم أن هذه القياسات لا تحكي لنا القصة كاملة ولا تشبع كل فضولنا إلا أنها تتصل بالكثير من مشاكل الفيزياء الأرضية الهامة والمتعلقة بتاريخ الأرض، ماضيها وحاضرها ومستقبلها.

مغناطيسية الأرض

ك. رانكون

كان المجال المغناطيسي للأرض موضوع البحث الذي نشره أستاذ الطبيعة الانجليزي وليم جلبرت (William Gilbert) في عام ١٦٠٠ بعنوان (de Magnete) (المغنطيس) وهو من أول ما نشر من موضوعات العلم التجريبي. ويطلق على جلبرت أحياناً لقب «أب الكهرباء». كان معروفًا آنئذ أن الابرة الممغنطة لا تميل إلى الاتجاه شمالاً فحسب، ولكنها إذا سمح لها بالحركة في مستوى رأسي فإنها تستقر مائلة إلى تحت عندما تكون بالنصف الشمالي من الكرة الأرضية. وتشير إلى ما فوق الأفق عندما تكون بالنصف الجنوبي. وللبحث عن تفسير لهذه الظاهرة صنع جلبرت كرة من الحجر المغناطيسي وتتبع خطوط مجالها المغناطيسي بأبرة ميل، فكانت الابرة ف أوضاع ميلها وإشاراتها فوق هذا النموذج تتبع تقريباً نفس الأسلوب الذي تتبعه عندما تنتقل على سطح الأرض. ومن ثم استنتج جلبرت أن الأرض تفعل فعل مغنطيس كبير.

كيف اكتسبت الأرض مغنطيسيتها؟ كان هذا اللغز يشتد غموضاً قرنًا بعد قرن. وبطبيعة الحال استنتج جلبرت أن باطن الأرض يتكون من مادة مغنطيسية. لكن العلماء تحققوا من أن حرارة نواة الأرض مرتفعة جداً، بحيث لا تسمح بأن تكون الأرض مغنطيسياً مستديماً – وقد طغت على هذه المشكلة مشاكل أخرى أشد غموضاً. ففي المقام الأول، وقد

اتضح أن المحور المغناطيسي بعيد عن القطب الشمالي الجغرافي بمئات الأميال وفي المقام الثاني، دلت المشاهدات المتتالية في أماكن متفرقة على سطح الأرض على أن البوصلة تنحرف عن الشمال الحقيقي بطريقة لا رابط لها، وفضلاً عن ذلك، فقد وجد أنه، على مر القرون، تطرأ تغيرات معينة على خطوط تساوي المجال المغناطيسي، والتفسير الوحيد الذي يمكن استنباطه هو أن باطن الأرض، حيث تتولد هذه المغنطيسية، لم يكنْ بالصلابة التي كنا نظنها. ولابد أن يكون باطنها في حالة حركة دائبة. وكما قال أستاذ الفيزياء الأرضية الشهير كريستوفر هانزتين (Christpher Hansteen) في أوائل القرن التاسع عشر «تعبر الأرض عن حركاتها الداخلية بلسان الأبرة المغنطيسية الصامت».

هيا نستمع إلى ما يمكن أن ترويه الإبرة لنا: إن شدة المجال المغناطيسي الأرضي صغيرة جداً، وهي تقاس بالقوة اللازمة لكي تنحرف إبرة البوصلة عن وضعها المختار. وقرب القطبين، حيث تكون شدة المجال أكبر ما يمكن، نجد أنها أضعف مئات المرات من شدة المجال بين مغناطيس صغير على شكل حدوة الفرس كالذي يستخدمه الأطفال. وتميل الإبرة عموماً لأن تتخذ مواضعها حول الأرض في خطوط منحنية تمتد من الشمال إلى الجنوب. وتتجه نحو الأرض إذا كانت بالقرب من القطب الشمالي المغنطيسي وتشير إلى أعلى وهي بالقرب من القطب الجنوبي. لكن هناك أماكن قليلة جداً على سطح الأرض حيث تتجه الإبرة تماماً نحو الشمال الحقيقي. ويتغير اتجاه الإبرة من مكان إلى مكان بحيث يبدو المجال غاصً بدوامات غير منتظمة. وتتغير شدة المجال واتجاهه على مر الزمن.

وقد جرى تسجيل هذه التغيرات المزمنة في مراصد مغنطيسية منذ أكثر من ٤٠٠ عام.

وهناك أسباب عديدة تحملنا الآن على الاعتقاد بأن مجال الأرض يتألف من مركبتين. فهناك أولاً خطوط قوى مغنطيسية ثابتة متحدة في اتجاهها دائماً مع محور دوران الأرض. وثانياً، يعتدل هذا المجال الرئيسي بفعل خطوط قوى أخرى تنشأ بطريقة مغايرة داخل الأرض، كما تغير هذا المجال في غير انتظام من مكان إلى مكان على سطح الأرض وعلى مر الزمن. ويسمى هذا المجال غير المنتظم «بالمجال المتخلف»، ويمكن معرفة قيمته بطرح قيمة المجال الرئيسي المحوري من قيمة المجال الحقيقي الذي تشير إليه البوصلة. وإذا رصدنا هذه الفروق على سطح الأرض – أي قيمة الاختلاف عن المجال الرئيسي مقداراً واتجاهاً عند الأمكان المختلفة – فإننا نحصل على صورة تمثل المجال المتخلف.

وعلى هذا فإن البوصلة توحي إلينا بأن الأرض ممغنطة بطريقتين مختلفتين، فها مغناطيسية أولية مرتبطة ارتباطاً مباشراص بدوران الأرض. ولها أيضاً مغناطيسيات ثانوية متنقلة لها أثرها بالإضافة إلى القوى الأولية.

والأرصاد التي أجريت على مر الأعوام تدلنا على شيء من طبيعة تغيرات هذا المجال الثانوي أو المتخلف. فالمجال المتخلف يتحرك ببطء حول الأرض، متجهاً في حركته نحو الغرب. وخطوط قوى هذا المجال نفسه

(وهي التي تبين اتجاه المجال وشدته عند الأماكن المختلفة) تتغير سريعاً في خلال فترات تقرب مدة الواحدة منها ١٠ أعوام، أو عاماً، أو حتى شهر.

والمجال المتخلف نفسه أشبه ما يكون بسحب تتجمع وهي متحركة شكلها في تغير مستمر، وتتحرك بأجمعها، وبهذا وضح أن المجال المتخلف يتحرك دائمً في اتجاه عربي كما تبينه الأرصاد التي أجريت خلال القرون الماضية. والمجال المتخلف حري بأن يتم دورة كاملة حول الأرض في ١٦٠٠ عام إذا استمر متحركًا بنفس المعدل الذي نشهده. ويعتبر هذا تطوراً مذهلاً في سرعته إذا ربطنا بينه وبين الأرض «الصلبة».

وإذا تعمقنا في تاريخ المغناطيسية الأرضية، تكشف لنا قصة أكثر غرابة. ففي الأعوام القليلة المنصرمة أمكن لنا أن نقرأ سجلاً مغناطيسياً لملايين الأعوام، وكانت وسيلتنا إلى ذلك بوصلة طبيعية زودتنا بها الطبيعية وجمدتها بين الصخور. وهذه الإبر المغناطيسية عبارة عن حبيبات دقيقة من مواد أكسيد الحديد المغناطيسي مثل ح٢ أ٣ (الهيمانات)،ح٣ أ٤ (الماجنيتايت). وعند درجات الحرارة المرتفعة تنتظم ذرات هذه المواد فوراً في خطوط تأخذ اتجاه أي مجال مغناطيسي ضعيف. وعلى هذا فبمجرد ما يلفظ بركان ما حممه المنصرمة فوقها فإنها تتمغنط حبيباتها الحديدية المعدنية في اتجاه المجال المغنطيسي المحلي في ذلك الوقت وبعد أن تتأثر كثيراً في اتجال المجال المغناطيسي المحلي في ذلك الوقت وبعد أن تبرد وتتجمد لا يمكن لمغناطيسيتها التي اكتسبتها أن تتأثر كثيراً بأي تغير يطرأ على المجال الأرضي. ومن ثم، فإن تلك الحبيبات تمثل حفريات مغنطيسية تسجل لنا

اتجاه مغناطيسي وقت أن تكونت تلك الصخور. وفي بعض بقع من العالم، تتراص الحمم البركانية فوق طبقة، مكونة مجموعة من مئات الطبقات تزودنا بتقويم وثيق للتاريخ المغنطيسي. وأيسلاند وشمال غربي الولايات المتحدة غنيتان بمثل هذه الرواسب التي نجد بعضها ظاهرًا على جدران المغارات.

وقد تضم الصخور الرسوبية أيضاً سجلاً مغناطيسياً حافلاً. فبعد أن تتفتت الجسيمات المغناطيسية من الصخور البركانية القديمة وتهبط مترسبة، فإنها تميل إلى أن تنظم في خطوط في اتجاه المجال المغنطيسي الأرضي. وعندما يتجمد القاع متحجراً، فإن الجسيمات المغنطيسية تثبت في اتجاه المجال عند ذلك الوقت.

وبفحص هذه المغناطيسيات المغمورة وسط الصخور عند أماكن مختلفة على وجه الأرض نجد أدلة على أن تغيرات مذهلة قد طرأتْ على المجال الرئيسي المحوري للأرض. فالقطب الشمالي المغنطيسي والقطب الجنوبي المغنطيسي قد تبادلا وضعيهما عدة مرات خلال العصر الثلثي (Tertiary period) (بين ٦٠ مليون عام، مليون عام مضت) ! أما طبقات الحم البركانية فتزودنا بالدليل على أن المجال بعد أن يظل ثابتاً مئات الآلاف من السنين، فإنه تتلاشى ثم يتكون ثانية واتجاه قطبيه عكس ما كانا عليه.

لابد أن نشير إلى أن هذا التفسير للسجلات الجولوجية غير مقبول لدى بعض المتخصصين في علم الفيزياء الأرضية، إذ يميل البعض إلى

الاعتقاد بأن حبيبات أكسيد الحديد تعكس اتجاه مغنطتها بطريقة ما مستقلة عن المجال الأرضي. غير أنه كلما زادت دراستنا للصخور المتعددة في الأماكن المختلفة ازددنا يقينًا بأن مجال الأرض قد انعكس فعلاً مرات عديدة.

وعلى هذا فإننا عندما نحاول أن نفسر كيف تولد المجال المغناطيسي الأرضي يجب أن نضع في اعتبارنا نوعين من التغيرات: تلك التغيرات التي تصحب المجال الرئيسي، وكذلك التغيرات الزمنية الطويلة الأمد في المجال المتخلف.

منذ أكثر من قرن مضى أثبت العالم الألماني الرياضي الطبيعي كارل فريدريك جاوس (Karl Friedrick Gauss) **بما لا يدع مجالاً للشك أن المجال المغنطيسي يجب أن ينشأ داخل الأرض. واليوم لم يعد بمقدورنا أن نشك كثيراً في أن المجال يتولد فعلاً بتأثير تيارات كهربائية ناشئة عن تحرك المواد في باطن الأرض وكان العالم الطبيعي والتر م. السازار** (Walter M. Elsasser) **أول من بين كيف يمكن للتحركات في النواة السائلة أن تولد المجال المتغير، وكان ذلك في عام ١٩٣٩.**

وكخطوة أولى، لنتصور أن المجال الرئيسي للأرض ينشأ عن تيارات كهربائية تسري في النواة (المكونة من حديد ونيكل) بالنظام الموضح بالشكل (٤ – أ). ويمكن أن تنشأ دوامات محلية بتأثير تحركات الحمل داخل النواة السائلة، ثم أن التيارات الكهربائية الثانوية المتولدة في هذه

المناطق تولد بدورها عددًا من المجالات المغنطيسية غير المنتظمة، ومن هذه يتألف المجال المتخلف للمغناطيسية الأرضية. ونظرًا لأن كثافة النواة السائلة مرتفعة جدًا وقوامها أثقل كثيرًا من السوائل العادية، فإن التغيرات في المجالات غير المستقرة تكون أميل إلى البطء. ومثل هذا النموذج من شأنه أن يفسر التغيرات الجغرافية والتغيرات البطيئة في شكل المجال المتخلف للأرض ونمطه.

أما عن تحرك المجال نحو الغرب، فلو صحت الصورة التي رسمناها لميكانيكية المجال المغنطيسي، فلابد أن نفترض أن نواة الأرض تدور داخل طبقة الغلاف. وهناك من الأدلة الفلكية الوجيهة ما يؤيد صواب هذا الفرض. فسرعة دوران الأرض حول نفسها ليست سرعة ثابتة، إذ تشير القياسات الدقيقة إلى أن فترة دوران الأرض حول نفسها في تغير طفيف مستمر. غير أن قانون كمية الحركة الزاوية ينص على أنه إذا تغيرت سرعة الحركة الدورانية لسطح الأرض فلابد أن يتوازن هذا التغير بتغير سرعة جزء آخر في جوف الأرض. وعلى هذا فإنه إذا زادت سرعة الطبقة الغلافية من الأرض فإن سرعة النواة لابد أن تقل، والعكس بالعكس.

وأبسط طريقة لتفسير هذه التغيرات في السرعة هو أن نفترض أن كلاً من نواة الأرض والطبقة الغلافية يؤثر على الآخر بطريقة تولدها التيارات الكهربائية (وهذا الأثر مطابق للتأثير الواقع في المحرك الكهربائي بن ذراعه المتحرك وملفاته). وأي تغير يطرأ على التيارات في نواة الأرض يغير من مقداره القوة الواقعة بين النواة والغلاف، وبالتالي يغير من سرعة

دوران كل منهما بالنسبة للآخر. وإذا حدث تغير فجائي فإنه ينشأ عنه زيادة كبيرة فجائية أو نقص كبير فجائي في سرعة دوران سطح الأرض. والواقع أن سرعة دوران سطح الأرض قد زادت في عام ١٨٩٧ زيادة فجائية بما يقرب من ٣/١٠٠٠ من الثانية في اليوم، كما أنها في عام ١٩١٤ قد نقصت بنفس القيمة تقريباً.

وهناك بعض النواحي الهامة في مغناطيسية الأرض لا يفسرها النموذج البسيط الذي ناقشناه: أولاً، لماذا يتحتم على التيارات أن تسري في اتجاه معين حول محور النواة دون الالتجاء المضاد، مما يترتب عليه أن يتجه المجال المغنطيسي الاتجاه الشمالي – الجنوبي؟ ثانياً هناك مشكلة أخرى تدور حول انعكاس موضعي قطبي الأرض. وإذا كان هذا النموذج صحيحاً لتحتم علينا أن نفترض أن التيارات تضمحل وتختفي من وقت لآخر خلال التاريخ الجيولوجي، ثم تعود لتسري مرة أخرى في الاتجاه المضاد.

كان من الضروري أن يعدل هذا النموذج، ويعد «الزاسار» (Elsasser) أول من تقدم بآراء سياسية يقوم عليها نموذج أفضل. فقد وجد أن المقلوب التقريبي لهذا النموذج يعتبر ممكناً من الناحية النظرية. ففي النموذج الأول يسري التيار من الشرق إلى الغرب حول نواة الأرض مولداً مجالاً يتجه من الشمال إلى الجنوب. وهناك احتمال آخر وهو أن يسري التيار من الشمال إلى الجنوب مولداً مجالاً يطوق النواة من الشرق إلى الغرب (شكل ٤ – ب). ويسمى هذا المجال المغناطيسي «مجال النمط

المغناطيسي»، ولمرابطته على سطح النواة لا يمكن أن يظهر له أثر ملموس على سطح الأرض. أما المجال الذي نقوم برصده فهو أثر ثانوي: لأنه عندما يتحرك السائل في النواة عبر مجال النمط الكهربائي تتولد تيارات ينشأ عنها المجال المغنطيسي الشمالي – الجنوبي للأرض.

مثل هذا النموذج يذلل الصعوبات الكبرى التي تواجهنا في النموذج الذي اقترح أولاً. فتبادل القطبين لموضعيهما يمكن تفسيره بأن نفترض وجود تغيرات معينة في نظام تحرك السائل داخل النواة بطريق الحمل. وفضلاً عن هذا فإن تعليل التغيرات الجوهرية في سرعة دوران الأرض يصبح أكثر يسراً. فالمغناطيسية السطحية للأرض ليست من الشدة بحيث تكون مسئولة عن القوة اللازمة التي تتواجد بين النواة والطبقة الغلافية، لكن مجال النمط الكهربائي حول النواة (الذي لا أثر له على سطح الأرض) يمكن أن يبلغ من الشدة القدر الكافي بحيث يفسر لنا مصدر هذه القوى.

لا تزال أمامنا مشكلة تفسير كيف نشأت التيارات الأولية عن مجال النمط الكهربائي؟ وتوجد في هذا الصدد عدة تخمينات ممكنة: قد ينشأ من التفاعلات الكيميائية، أو من الفروق في درجة الحرارة، التي تحدث فرقاً في الجهد بين قطبي النواة وخط استوائها (ويكفي فولت واحد لهذا الغرض)، وقد ينشأ التيار من نوع ميكانيكية المولد الكهربائي الذي يعمل من تلقاء نفسه، ويشمل النواة والطبقة الغلافية.

وأياً كانت تلك الميكانيكية، فما لاشك فيه أن المجال الأرضي مرتبط بطريقة ما بدوران الكوكب. وهذا يهدينا إلى كشف هام عن دوران الأرض نفسه. ففضلاً عن تبادل القطبين المغنطيسيين لموضعيهما، فإن هذين القطبين يواصلان حركتهما في بطء شديد لإتمام عمليات التبادل خلال التاريخ المغنطيسي الحافل المسجل على صفحات الطبقات الصخرية للأرض. وليس في وسعنا إلا أن نفترض أن المحور الجغرافي للأرض قد غير موضعه أيضاً وبعبارة أخرى أن كوكبنا قد انحرف في دورانه حول نفسه مغيراً قطبيه الجغرافيين. وقد يعود هذا إلى عملية تكوين الجبال أو إلى تيارات الحمل بالطبقة الغلافية من جسم الأرض. وإذا تحققت نظرية حركة القطبين الجغرافيين فمن الطبيعي أن تثير اهتمام علماء الجغرافيا إلى حد كبير. فلعلها تفسر، مثلاً، ما نعلمه من وجود أثر مناطق جليدية في ماضي التاريخ الجيولوجي السحيق عند خط الاستواء الحالي.

القسم الثالث

الكرة الصخرية ـ القشرة

الجزء الأول: شكل الأرض

وايكو أ. هايسكانن

يشغل المؤلف منصب مدير معهد المساحة ومقاييس الأرض ويشمل قسمي الخرائط والتصوير الفوتوغرافي من الجو التابع لجامعة ولاية أوهايو منذ عام ١٩٥١. وقد حصل هايسكانن على درجة البكالوريوس ودرجة الماجستير في العلوم من جامعة الدولة بهلنسكي بموطنه فنلنده، حيث ولد ببلدة «كانجاسلامبي» وكان الابن التاسع لأب فلاح. وفي عامي ١٩٢٠، ١٩٢١ ذهب إلى ألمانيا حيث درس على دافيد هلبرت (David Hilbert) وماكس بلانك (Max Planck) وألبرت أينشتاين (Albert Einstein)، وفي عام ١٩٢٦ أصبح هايسكانن أستاذاً مساعداً لعلم المساحة ومقاييس الأرض بالمعهد الفنلندي للعلوم التطبيقية، ثم رقي إلى أستاذ في العام ١٩٣١. وكان هاسكانن عضوًا في البرلمان الفنلندي في الفترة ما بين عام ١٩٣٣ وعام ١٩٣٦.

الجزء الثاني: قشرة الأرض.

والتر هـ. بوتشر

ولد بمدينة أكرون في أوهايو عام ١٨٨٨، وحصل على درجة الدكتوراة من هيدلبرج عام **١٩١١** وقد باشر دراساته عن تركيب قشرة الأرض وديناميكيتها بجامعة «سيتسيتاني» طوال السبعة والعشرين عاماً التي تلت ذلك. وفي عام **١٩٤٠** عين أستاذًا للجيولوجيا بجامعة كولومبيا ثم رئيساً للقسم في عام ١٩٥٠.

الجزء الثالث: أخاديد المحيط الهادي

روبرت ل. فيشر، روجر ريفيل

المؤلفان عضوان بمعهد «سكريبس» لعلوم البحار بكاليفورنيا. ويعمل ريفيل بمعهد «سكريبس» منذ عام ١٩٣١ وهو الآن مديراً لهذا المعهد. وكان ريفيل يشتغل بعلوم البحار في السلاح البحري أثناء الحرب العالمية الثانية، وكان رئيساً لقسم علوم البحار للعمليات الحربية التي عهد إليها بتجربة القنبلة الذرية عند بيكيني عام ١٩٤٦، أما «فيشر» فهو جيولوجي تخصص في علوم البحار وقد بدأ دراسته للبكالوريوس بمعهد كاليفورنيا للعلوم التطبيقية ثم أتم دراسته بجامعة «نورث وسترن» وبمعهد «سكريبس». ويباشر فيشر دراسات حقول التجارب بكثير من أخاديد المحيط الهادي. وقد كان الرئيس العلمي لبعثات معهد «سكريبس» للشواطىء القريبة للمكسيك وأمريكا الوسطى.

شكل الأرض

وايكو هايسكانن

لوكانت الأرض كروية تماماً لكانت الحياة أبسط كثيراً وخاصة بالنسبة لراسمي الخرائط والجغرافيين والملاحين المتخصصين في علم الفيزياء الأرضية والمنقبين عن البترول وكثيرين غيرهم من الأخصائيين. أما وأن الأرض منبعجة عند خط الاستواء ومنبطحة عند القطبين (نتيجة لدوران الأرض) فإن ذلك يسبب كل أنواع الصعوبات العملية للجنس البشري، كما يعقد الأمور كثيراً بالنسبة لعلم المساحة ومقاييس الأرض. والأدهى ذلك أن الأرض ليست منتظمة في شكلها البيضاوي، وفضلاً عن عدم انتظام سطحها (من جبال وسهول وبحار) فإن شكل الأرض أكثر تشوهاً من ذلك، فهو أشبه ببرتقالة بعجتها الضغوط.

لا تخطئوا فهم ما أعني: إن كل مظاهر الخروج عن الشكل الكروي. تعتبر صغيرة بالنسبة لأبعاد الأرض فالفرطحة عند القطبين مثلاً من الضآلة بحيث أن المسافة بين مركز الأرض وسطحها عند القطبين تقل بحوالي ١٣ ميلاً فقط عن المسافة بين المركز والسطح عند خط الاستواء — وهو فلاق يبلغ ٣/١ % ثلث في المائة فقط من متوسط نصف قطر الأرض البالغ ٤٠٠٠ ميل تقريباً. غير أن هذه الفروق رغم اعتدالها فهي تجعل رسم الخرائط المساحية للأرض وتحديد شكلها أمرين غاية في الصعوبة. فليست لدينا قدمة نستطيع أن نطوق بها الكرة التي نعيش فوقها: والوسيلة

الوحيدة لتتبع محيط الأرض وتسجيل أبعاده هي أن ننتقل على سطحها ومعنا «مقياس جاذبية»، لرصد الفروق الدقيقة في مقدار الجاذبية من نقطة إلى أخرى، كدليل على المرتفعات والمنخفضات في سطح الأرض على طول المحيط المتموج.

والأساس في عمليات الرصد هذه هو القانون العام للجاذبية لإسحق نيوتن: يتجاذب الجسمان بقوة تتناسب طردياً مع حاصل ضرب كتلتيهما وعكسياً مع مربع المسافة بينهما. وبالنسبة للجسم الكروي يمكن اعتبار كتلته مركزة عند مركزه، وعلى هذا فإن قراءات الجاذبية عند سطح الأرض تمدنا بمعلومات يمكننا أن نحسب منها، مع غيرها من المعلومات، كثافة الكتلة الأرضية الواقعة تحتنا، كذلك التغيرات في المسافة بين مركز الأرض ومختلف النقط على سطحها.

ولابد أن نأخذ في اعتبارنا عوامل أخرى معينة تؤثر في قوة الجاذبية. وعلى سبيل المثال، نجد أن القوة المركزية الطاردة لدوران الأرض تضاد قوة الجاذبية، وتكون هذه القوة الطاردة المضادة أكبر ما يمكن عند خط الاستواء، ثم تقل تدريجياً مع خطوط العرض حتى تصل إلى الصفر عند القطبين ولهذا السبب، وبسبب قصر المسافة أيضاً عند القطبين، تزداد قوة الجاذبية قليلاً كلما اتجهنا نحو القطبين. ومن النتائج الهامة المترتبة على ذلك أن قراءاتنا تختلف مدلولاتها باختلاف خطوط العرض إذا فرضنا أن الظروف متماثلة فقد كان من المتوقع في الدورة الأولمبية بملبورن في أستراليا عام ١٩٥٦ أن يسجل أبطال الوثب العالي وقاذفو الرمح أرقاماً قياسية

أعلا من تلك التي سجلت بهلنكسي عام ١٩٥٢. والأرقام القياسية الأولمبية القديمة جميعاً ضربت في الواقع بأرقام أعلا في دورة ملبورن، ما عدا الوثب الطويل. ومع كل، فلا يمكننا أن نعزو إلى تأثير الجاذبية قدراً يعدو جزءاً ضئيلاً جداً من الفرق بين الأرقام الجديدة والأرقام القديمة، والبالغ ١٧ قدماً و٤ بوصات في قذف الرمح، ٢,٨ بوصة في الوثب العالي.

وتأثير الأرقام القياسية في الألعاب الرياضية ليس إلا مثلاً ضئيل الأهمية فمجال الجاذبية الأرضية له كثير من التطبيقات الواقعية والهامة، ما بين تحديد مواقع الحقول البترولية، إلى الاختبارات العلمية البحتة المتصلة بحجم الأرض وشكلها وتركيبها. وجماعات الرصد التثاقلي تجوب أنحاء العالم لقياس الجاذبية في أكمل بقعة، وسوف ينشط هذا العمل بمناسبة السنة الجيوفيزيائية الدولية.

وتصل الأجهزة الحديثة في دقة تقديرها للجاذبية الأرضية إلى حد تقريبها إلى جزء من ٥٠ مليون. ففي الطريقة التقليدية يستخدم البندول المتذبذب: يتخذ زمن الذبذبة لبندول ذي طول معين مقياساً للجاذبية، ويمكننا الحصول على تقدير دقيق جداً للجاذبية الأرضية بتعيين زمن بضعة ملايين من الذبذبات ولايزال البندول هو الجهاز المعياري لتقدير القيمة المطلقة للجاذبية، غير أن الجهاز الشائع استعماله اليوم هو مقياس الجاذبية المعروف بالجرافيميتر (Gravimeter) وهو نوع من المقياس الزنبركي متناهي الحساسية. وتقاس الجاذبية بمقدار الاستطالة التي يحدثها جذب

الأرض في سلك رفيع من السيليكا أو من سبيكة من النيكل والصلب، يتدلى منه ثقل صغير. ونظراً لأن وزن مقياس الجاذبية هذا لا يتعدى بضعة أرطال فإن من السهل حمله إلى أي مكان وتقدير قيمة الجاذبية في زمن لا يعدو ثلاث أو خمس دقائق. وقراءات مقياس الجاذبية قراءات نسبية، أي تؤخذ بالمقارنة بين مكان وآخر، ويجب العودة في حسابها إلى قراءة مطلقة تعين بطريقة أخرى في محطة تعتبر مرجعاً أساسياً.

وفي أعماق المحيط تؤخذ القراءات داخل غواصات بجهاز صممه في براعة أستاذ الفيزياء الأرضية الهولندي ف. أ. ڤيننج ماينز (F. A. Vening Meinesz) وفي هذا الجهاز تستعمل ثلاثة بندولات كي تتلافى أثر تدخل حركة الماء وتسجل الجاذبية الأرضية فحسب (ومن سوء الطالع أنه ليس من السهل الحصول على غواصة تخصص للأغراض العلمية البحتة). وتعين مقادير الجاذبية في المياه الضحلة باستعمال مقياس جاذبية معقد، موضوع في صندوق محكم، من تصميم شركة الخليج للبترول (Gulf Oil Company) فيدلي الجهاز إلى القاع وتسجل القراءات من قارب على سطح الماء.

وقد اختير برج هلمرت بمرصد «بوتسدام» بألمانيا ليكون مقراً للمحطة المعيارية العالمية لتقارن بها قراءات الجاذبية في كل مكان. وفي تلك المحطة استعمل بندول دقيق جداً لتعين قيمة الجاذبية المطلقة، وحددت قيمتها بمقدار ٩٨١,٢٧٤ جال، تلك التسمية للوحدة التثاقلية مشتقة من اسم العالم جاليليو (Galileo) وهي قوة التثاقل التي يعبر بمقدار

العجلة التي يتحرك بها جسم ساقط نحو الأرض دون عائق. ومعنى هذا أن الجسم في بوتسدام تتزايد سرعته بمعدل ٩٨١,٢٧٤ سم/ ثانية/ثانية.

والمتبع في التطبيق العملي ألا تدرج معظم قراءات الجاذبية في بوتسدام ولكنها تدرج في محطات رئيسية أخرى مرتبطة ببوتسدام ارتباطاً مباشراً أو غير مباشر. وهناك مئات من المحطات الرئيسية والعيارية في واشنجتن وباريس وتيدنجتن بانجلترا وأماكن أخرى.

والهدف هو أن تنتشر في النهاية محطات في جميع أنحاء العالم ترتبط بمحطة بوتسدام العيارية. وسوف يساهم برنامج السنة الجيوفيزيائية العالمية بدور هام في تحقيق هذه الغاية. وعندما تحصل على قراءات للجاذبية يمكن مقارنتها في جميع أنحاء العالم سيكون في مقدورنا أن نقدر ونحدد الشكل الحقيقي للأرض.

عندما يعالج رجل المساحة وعلم المقاييس دراسة الأرض يجد أمامه ثلاثة «أراض» أو ثلاثة أشكال مختلفة للأرض. فهناك أولاً «أرض المتخصص في علم الهندسة الرياضية» (أي الأرض كما يعالجها أستاذ الهنسة الرياضية – جسم بيضاوي تماماً ومنتظم، وهو تقريب لشكل الأرض ويتخذ مرجعاً عامًا). ثم هناك «أرض مستوى البحر» (أي سطح الأرض العمودي على اتجاه قوة الجاذبية عند جميع النقط التي تحدد السطح)، ونجد شكل الأرض هنا غير تام الانتظام بسبب التغيرات في كتلة الأرض، فالسطح متعرج، ويمكن قياس تعرجه عند أي موضع باستعمال

الجاذبية. وأخيراً هناك الشكل الحقيقي للأرض نفسها، بجبالها ووديانها وسهولها ومنخفضات محيطاتها.

والشكل البيضاوي المتخذ مرجعًا عامًا هو الشكل الذي استنبطه عام ١٩١٠ ج.ف. هايفورد (J. F. Hayford) عضو مصلحة السواحل ومقاييس الأرض بالولايات المتحدة.

رسم يبين شواذ الجاذبية في منطقة الألب. ليست قوى الجاذبية عند مواضع متعددة تختلف في ارتفاعها وتقع بين «باسلو» على الدانوب الأعلى ببافاريا والبندقية عند سطح البحر. وقد وجد أن الجاذبية أقل مما يجب أن تكون عليه عند ارتفاعات هذه الأماكن. مما يدل على وجود جذور صخرية خليقة نسبيًا بارزة تحت الجبال.. ووحدة الجاذبية في الملليجال.

وفي عام ١٩٣٠ استنبط المؤلف بالاشتراك مع أستاذ الفيزياء الأرضية الإيطالي ج. كاسييس (G. Cassinis) معادلة تعطي القيمة النظرية لقوة الجاذبية على سطح الأرض عند أي خط عرض، وذلك على فرض أن شكل الأرض بيضاوي منتظم كما حدده هايفورد في مرجعه. وتستخدم هذه المعادلة معياراً للكشف عن تغيرات الجاذبية أ وشواذها. ومن هذه التغيرات أو الشواذ يمكننا استنباط صورة دقيقة للقشرة الأرضية وطبقاتها.

لنفترض أننا رصدنا قراءة للجاذبية عند نقطة معينة على جبل الألب في سويسرا. هذه القراءة تختلف بالطبع عن القيمة النظرية أو المتوسطة لخط العرض هذا. وأول الأسباب وأهمها هو أن هذه النقطة واقعة على جبل، فبعدها عن مركز الأرض أكبر من البعد المتوسط. ولهذا يجب أن نصحح هذه القراءة لتعطينا مقدار الجاذبية المعياري عند مستوى سطح البحر بالنسبة لهذه النقطة من الجبل. ويبلغ مقدار التصحيح حوالي ٠,٠٠٩٥ جال لكل ارتفاع قدره ١٨٠٠ قدم. وبعد ذلك قد يفترض المرء أن علينا أن نُجري تصحيحاً آخر بالنسبة للزيادة في الجذب الناجمة عن كتلة الجبل الواقعة تحت هذه النقطة (وبالمثل أنه يجب في حالة القراءات فوق سطح البحر أن ندخل تصحيحاً بالنسبة لخفة وزن الماء)، غير أنه من الغريب أن كتلة الجبل لا ترفع قراءة الجاذبية بالطريقة التي قد يتوقعها المرء. والسبب في هذا أن القشرة الأرضية في هذا المكان تتكون من مادة أقل كثافة ولها جذور تمتد إلى مسافات أعمق مما نجدها في الأراضي المنخفضة (أنظر شكل ٥)، في حين أن القشرة الأرضية تحت أعماق المحيطات رقيقة جداً وتمتد جذور القارات في القشرة إلى عمق يصل إلى ٣٠ ميلاً، وعند هذا العمق يكون الوزن، متساوياً تقريباً عند كل الأماكن، سواء كان تحت الجبال أو السهول أو البحار. وتسمى هذه الحالة بحالة يتساوى فيها التوازن الاستاتيكي (Isostatic equilibrium). ويربط قراءات الجاذبية بارتفاع السطح عن البحر نحصل على مقدار لسمك القشرة عند أي مكان. وقد عينت مع بعض طلابي هذا السمك في عدد من الأماكن بأوروبا وآسيا وأفريقيا وتتفق نتائجنا مع تلك التي

حصل عليها السيسمولوجيون من مشاهداتهم لزمن وصول موجات الزلازل.

إذا أخذنا قراءات للجاذبية في كل مكان على سطح الأرض وصححناها بالنسبة لسطح البحر فإننا نحصل على بروفيل تثاقلي يعبر عن شكل الأرض في صورة سطح متعرج كما أشرنا إلى ذلك من قبل. وهو يبين شواذ الجاذبية الناتجة عن الزيادة أو النقص في الكتلة. وغالبًا ما يكون السطح التثاقلي عند أي مكان على وجه الأرض مائل بالنسبة للسطح البيضاوي تماماً. وإذا أدلينا ثقلاً من خيط فإن هذا الخيط يكون عموديًا على جسم الأرض عند هذا الموضع وليس عمودياً على المجسم البيضاوي الذي اتخذناه مرجعاً؛ والزاوية الواقعة بين العمودين تساوي زاوية ميل السطح التثاقلي على سطح المرجع البيضاوي. ويسمى انحراف الخيط «بالانحراف عن الاتجاه الرأسي».

في عام ١٨٤٩ أقترح العالم الفيزيائي الانجليزي السير جورج ستوكس (George Stokes **) أن شكل المجسم الأرضي «يمكن حسابه من قياساتنا للجاذبية في مختلف أنحاء العالم». وفي عام ١٩٢٨ وضع «فيننج ماينيز» معادلة لاستنباط ميل السطح عند أي مكان. ولا يزال ما لدينا من المشاهدات أقل بكثير مما يكفي للوصول إلى صورة دقيقة لشكل المجسم الأرضي، ولكن بعض طلابي بالمعهد الدولي للتساوي الاستاتيكي بفنلندة استنبطوا شكلاً تقريبياً له من واقع القياسات التي في حوزتنا، كما أن النتائج التي حصل عليها «ل. تاني» (** L. Tanni **) في عام ١٩٤٨ لا**

يعدو الخطأ فيها ٣٠ قدمًا عند معظم أماكن الرصد التي أجرى الحساب عندها.

والطريقة الوحيدة لإيجاد الاتجاهات الرأسية الحقيقية لشكل الأرض، ومن ثم قياس نصف قطر الأرض وحجمها،هي أن نعرف ميل السطح للمجسم الأرضي عند أمكنة مختلفة (أنظر شكل ٦). ويلزم أيضاً أن نعرف الاتجاه الرأسي الحقيقي لكي نحدد المواقع على سطح الأرض بمعاينة النجوم. فمثلاً لتحديد خط العرض يكون مرجعنا نقطتين: النجم الشمالي ونقطة السمت وهي النقطة التي تعلنا رأساً. وكما يستبين من الخيط الذي يتدلى منه ثقل (المطمار) فإن نقطة السمت تتغير بتغير ميل السطح للمجسم الأرضي عند موضع الرصد، وإذا شئنا مقارنة قراءاتنافلابد أن نعين نقط السمت من الاتجاه الرأسي الحقيقي (العمودي على الشكل الهندسي التام الانتظام) عند كل محطة على سطح الأرض.

والفكرة الأساسية في رسم الخرائط بالطريقة التثاقلية (قياس الجاذبية) وفي البرنامج الحالي لقياسها في كل أنحاء العالم، هي أن انحرافات المجسم الأرضي وميل سطحه عند كل مكان يمكن استنباطهما من الشذوذ المشاهد في الجاذبية. وتوضع الخرائط عادة باختيار نقط المراقبة وقياس أبعاد النقط الأخرى واتجاهاتها بحساب المثلثات. ويتطلب هذا العمل أن نفترض قيماً معينة لانحناء السطح الذي نعتبره مرجعًا، للاتجاهات العمودية عند نقط المراجع. ويلاحظ أن خرائط المناطق المختلفة لا تلتئم الواحدة مع الأخرى التئاماً صحيحاً لأنها منسوبة إلى مراجع مختلفة. وإذا كانت

المنطقتان المراد وضع خريطتيهما متقاربتين فإن الاختلافات يمكن تصحيحها بالربط المباشر بينهما. أما إذا كانت المساحات كبيرة جداً أو تفرق البحار بين أجزائها بحيث يتعذر قياس الأبعاد والمثلثات فوق السطح، فإن الأمر يصبح عسيراً أو مستحيلاً. وعلى كل حال، فإن الطريقة التثاقلية تعتبر أسرع وأدق طريقة لربط جميع الخرائط بالنسبة لمرجع مشترك موحد.

وحتى عام ١٩٤٨ كانت إحداثيات النظام السويدي تختلف عن إحداثيات النظام الهولندي بأكثر من ٣٠٠ قدم لنفس نقطة المراقبة، وكان النظام الفرنسي يختلف عن النظام الانجليزي بحوالي ٦٠٠ قدم. ولم يمكن لأحد أن يتكهن بالفروق بين النظم المساحية بالنسبة للقارات المختلفة.

إذن فإرساء نظام مساحي عالمي موحد هدف من أهداف برنامج الجاذبية العالمي «وسيكون هذا ميسورًا عندما يتم لنا الحصول على قراءات كثيرة تسمح بتطبيق معادلتي «ستوكس»و «فيننج ماينز» لشكل المجسم الأرضي تطبيقاً دقيقاً. وستمكننا البيانات أيضاً من رسم خرائط للمناطق المتخلفة التي لم تعين بها بعد نقط مساحية.

ويمكننا عمل خريطة دقيقة إلى حد معقول بتحديد مجموعة من المواضع التفرقة تحديداً فلكياً مع إجراء التصحيح اللازم لها بسبب الانحراف عن الاتجاه الرأسي.

يعقد الأمل في أن يتم قياس الجاذبية على نطاق عالمي خلال الأعوام القليلة المقبلة. وقد وضع المؤلف برنامج هذا العمل بمعمل أبحاث الخرائط بجامعة ولاية أوهايو، تحت إشراف مركز كمبردج التابع للسلاح الجوي الأمريكي. ويتعاون في هذا العمل ثلاثون دولة، ومعظم شركات البترول الكبرى، ومتخصصون في علم المساحة ومقاييس الأرض من جميع أنحاء العالم. ولدينا كبداية مئات الألوف من قراءات الجاذبية التي وافتنا بها بسخاء شركات البترول، والقياسات التي تمت محلياً في بعض الدول، وحوالي ٤٠٠٠ محطة قيست في البحر، وقام بقياسها أساساً فيننج ماينز وموريس أيوينج (Maurice Ewing) وج. لامار فورتسيل (J. Lamar Wozel) بجامعة كولومبيا.

تنشأ الأخطاء في قياس نصف قطر المجسم الأرضي (الشكل البيضاوي المنقط) بسبب عدم انتظام شكل «سطح مستوى البحر» أو السطح التثاقلي (المنحنى الثقيل). وحيث يكون السطح التثاقلي أكثر فرطحة من الشكل البيضاوي (المتخذ مرجعاً) كما بين النقطتين أ، ب، فإن العمودين عند أ، ب يتقابلان عند نقطة أبعد من المركز الحقيقي، ومن ثم يكون نصف القطر نق$_{١}$ أكبر مما يجب. وبحيث يكون شكل السطح التثاقلي أكثر انحناء، كما بين النقطتين ب، ج يلتقي العمودان عند نقطة أقرب من المركز مما يؤدي إلى قيمة لنصف القطر نق$_{٢}$ أصغر مما يجب.

وتنحصر الأغراض الرئيسية من البرنامج في مراجعة أبعاد الأرض، وإيجاد شكل المجسم الأرضي بالتفصيل، وتحويل النظم المساحية الحالية إلى

نظام عالمي موحد دقيق، وإعداد نقط تتخذ مراجع عند إعداد خرائط مساحية للمناطق التي تعوزها نقط مساحية. وطريقة الرصد التثاقلي، سوف تيسر لنا مهمتنا في إنجاز هذه الأعمال جميعها.

قشرة الأرض

والترهز بوتشر

يجتاز علم الجيولوجيا عهداً من الاكتشاف لا نظير له. فالتعاون الوثيق بين الجيوفيزيائيين والجيولوجيين في عمليات الاستكشاف المنظمة على القشرة الأرضية، مستخدمين أحدث وسائل الاختبار، قد أشاح عن معلومات جديدة عن قاع المحيطات، ووصل بنا إلى أغوار عميقة في سطح القارات، ومكننا من أن نحيط بالجيولوجية الإقليمية أحاطة دقيقة. ومن ثم فإن أراءنا التقليدية عن العمليات الفيزيائية والكيميائية التي نشأت بها الأرض، والتي لا تزال حتى الآن تحور في قشرتها، هذه الآراء تتعرض اليوم لهزة كبرى. بأي أسلوب تم بناء القارات والمحيطات هذا البناء المتنافر؟ هل عملية البناء هذه لا تزال مستمرة فتخلق في المستقبل قارات جديدة؟ في بحثنا عن إجابة لهذين السؤالين يغمرنا جو من الشك والطموح التي ينطبع بها أي علم وهو في عصر ازدهاره. ويعالج هذا الجزء من الكتاب بعض ما اعترى آراءنا من تطورات أوحت بها تجاربنا في بضع عشرات السنين الماضية.

قشرة الأرض طبقة باردة صلبة نسبياً، لا يزيد سمكها في الأرجح على ٣٠ ميلا أي أقل من ٨/ ١٠٠٠ من المسافة بين سطح الأرض ومركزها. وتقوم فكرة وجود القشرة الأرضية على فرض أنه تحت عمق معين ترتفع درجة الحرارة ويشتد الضغط تفقد الصخور قدرتها على مقاومة

تحور شكلها تحت عوامل الإجهاد المستمرة لفترة طويلة من الزمن. وبدل ما نشاهده من معدل ارتفاع درجة الحرارة في ماسورات الآبار ومهابط المناجم على أن درجة الحرارة لابد أن تصل إلى ١٠٠٠ درجة مئوية عند عمق ٣٠ ميلاً تحت سطح القارات والمعتقد أن الصخور الموجودة تحت هذا العمق يتعذر عليها أن تقاوم فروق الإجهاد الصغيرة نسبياً، وأنها تتشكل لدنة تحت هذا الإجهاد.

إن ما يقع تحت نظرنا من هذه القشرة لا يعدو جزءاً صغيراً منها. والقطاعات التي تتمكن من رؤيتها إنما جلبتها إلى أنظارنا عوامل الرفع والميل والتعرية في القارات والجزر. وكلما ازداد ما يتكشف لنا من القشرة، يدلنا تنوع موادها وما سبق أن عانته من عوامل الطي والتشقق على وجود نشاط ديناميكي داخل الأرض، الأمر الذي يتعارض والرأي السائد عن استاتيكية القشرة كمجموعة من الطبقات المتحدة المركز.ولابد أن يكون مبعث هذا النشاط تغيرات قوية تجري تحت القشرة، مما يوحي إلينا أن الأرض العتيقة تدب فيها الحياة، أكثر مما يتصوره المرء من قراءة الكتب الدراسية، وتفسير هذا النشاط الديناميكي من المشاكل المعقدة في فيزياء الأرض.

ولن يتيسر لنا أن نهتدي إلى تفسير شاف قبل أن ننمي معلوماتنا عن تركيب الطبقات العميقة من القشرة وتلك هي المهمة الملقاة على عاتق الجيوفيزيائيين والجيولوجيين في عصرنا الحاضر وهم يعملون يداً بيد في أسلوب جماعي. ومجال عمل الجيولوجي ينحصر في الجزء الظاهر من

طبقات الأرض، والتي تغطي ربع مساحتها تقريباً. أما الثلاثة أرباع الباقية فيحجبها الماء والثلوج، وكذلك تختفي علينا الأجزاء العميقة من القشرة في أي مكان ولهذايتحتم علينا أن نكشف غوامضها كشفاً غير مباشر بأرصدنا الجيوفيزيائية مثل قياس القيم المحلية للجاذبية وقياس سرعة الأمواج الصوتية في طبقات الأرض المرنة المختلفة، وقياس اتجاه المجال المغناطيسي الأرضي المحلي، وشدة هذا المجال. والنتائج التي تسفر عنها هذه القياسات يجب أن تترجم بعد ذلك إلى ما يمكن أن تعنيه من حقائق جيولوجية محضة.

ومن المناسب أن تتناول بالبحث الجزء الواقع تحت القارات والجزء الواقع تحت المحيطات كلاً على حدة. ما هو تركيب القشرة في الجزء الواقع تحت القارات؟ إننا نستمد أول الأدلة في هذا الصدد من تحليل أزمنة وصول الموجات الزلزالية التي تصدر من نقط معمولة تعرف بالبؤر وتسري في أجزاء من هذه القشرة. وتدل هذه القياسات على أن القشرة تحت كل القارات تتركب من جزءين: الجزء الأعلى، وتنتقل فيه الموجات المرنة بسرعة صغيرة نسبياً، والجزء الأسفل، تسري فيه الموجات بسرعة أكبر. ومقدار الفروق بين هذه السرعات يدل على اختلاف مواد صخور طبقتي القشرة. ودراساتنا في المعمل لسرعة انتقال الموجات المرنة في مختلف أنواع الصخور تمدنا بالدليل على نوع الصخور السائدة في كل من الطبقتين.

هناك نوعان عامان من الصخور الأرضية، والتي نسميها بالصخور النارية، وقد تكونت بالتبريد والتبلور بعد حالة الانصهار الأصلية. والنوع الأول غني بعنصري السيليكون. والألومنيوم، ولذا أطلق عليه الاسم

«سيالي» (Sialic) أما النوع الثاني فنسبة هذين العنصرين فيه ضئيلة، لكنه غني بعنصري المغنسيوم والحديد، ويسمى هذا النوع بالاسم «مافي» (Mafie) وأكثر أنواع الصخور السالية شيوعًا هو الجرانت، وأكثر الأنواع المافية شيوعاً هو البازالت. وفي هذا الجزء من الكتاب سيكون المقصود بالتعبيرين «جرانيت» و«بازلت» هو النوعين المذكورين النارية عموماً.

وباختيار هذه الصخور في المعمل نجد أن انتقال الموجات المرنة في البازالت أسرع منه في الجرانيت. وحيث أن موجات الزلازل تنتقل في الطبقات العميقة من قشرة القارات أسرع من انتقالها في الطبقات السطحية، من ذلك نستنتج أن الطبقات العميقة مكونة من البازالت، بينما تتكون الطبقات السطحية من الجرانيت. ويبدو أن مساحات شاسعة من قاع المحيطات تخلو من الجرانيت، فتتكون القشرة هناك من البازالت المغطى بغلاف من الطبقات الرسوبية الحديثة.

ويوحي هذا التوزيع بأن جرانيت القشرة الأرضية قد نشأ كنوع من الزبد فوق الطبقة البازالتية الأصلية، وكان هذا هو الرأي السائد زمناً طويلاً. غير أن هذا الرأي قد أصبح موضعًا للشك بسبب بعض الخصائص التي يقترن بها توزيع الصخور الجرانيتية. فإنك لا تجد بين الصخور الجرانيتية بالأرض كتلة ضخمة واحدة منها تقع ببساطة فوق الطبقة البازالتية، ولكن مثل هذه الكتل طالما توجد مرتبطة ارتباطاً وثيقاً بالتجمعات الضخمة من الصخور الرسوبية القديمة، التي يبدو أنها عانت من جراء غزو الصخور

الجرانيتية لها نوعاً من التفاعلات، فتحولت عند درجات الحرارة والضغوط المرتفعة إلى ما يسمى بالصخور المتحولة.

ومفتاح مشكلة تركيب القشرة يكمن في هذا التنافر في علاقات تركيب الجرانيت والبازلت. وعلينا أن نمعن النظر في تركيب القارات كما تبدو لنا عند سطحها، كي نحيط بالموضوع إحاطة أدق.

تشترك القارات جميعاً في أوجه التركيب الأساسية. فكل قارة تحتوي على الأقل على «درع من صخور عصر ما قبل الكمبري» (Per-Cambrian Shield) يغطي منطقة كبيرة من الهضاب تتكون أساساً من صخور قديمة، عبارة عن طبقات رسوبية نتيجة لغزو الصخور النارية لها، ومعظمها من الجرانيت. وتعتبر هذه الصخور الأساس بالنسبة لجميع القارات. وقد نشأت أصلا مكشوفة عند أعماق كبيرة تحت السطح، أما الآن فتبدو مكشوفة عند السطح، منحنية إلى أعلى بتأثير عوامل الرفع المحلية، ثم استوى سطحها بعد ذلك بفعل عوامل التعرية.

وصخور الأساس التي يظهر منها جزء في كل قارة، تمتد مختفية عن الأنظار تحت طبقة من الرواسب الحيوانية القديمة (Paliosoic Sedements) التي ترسب فوقها. الوجه التركيبي الثاني تمثله إذن هذه الطبقات الرسوبية التي تعلو صخور أساس عصر ما قبل الكمبري. وتتكون الطبقات الرسوبية عموماً من بضعة آلاف الأقدام من الحجر الجيري وضرب من الصخور تعرف بالطفل، والحجر الرملي. وأخيراً يوجد بكل

قارة حزام من الجبال يعتري طبقاتها الكثير من الطيات – وهذه الجبال عبارة عن كتل ضخمة من الصخور الرسوبية، معظمها من أصل بحري، مضغوطة وذات طيات، وتتخللها فوالق عديدة.

وفي عام ١٨٥٩ لاحظ الجيولوجي الأمريكي «جيمس هول» (James Hall) أنه كلما ابتعد المرء عن سهول الطبقة الرسوبية متجهًا نحو الحزام الجبلي، ازداد سمك الطبقة الرسوبية، وانحدرت صخور الأساس الواقعة تحتها إلى أغوار غير معلومة. وتظهر الصخور الجرانيتية وسط هذه الطبقة السميكة من الرواسب. فالجرانيت ليس جزءاً من صخور الأساس «الخامدة» لكنه صخر ناري «نابض بالحياة»، أغار على الطبقات الرسوبية في كتل كبيرة وحولها إلى صخور متحولة من نفس النوع المقترن بالصخور الجرانيتية في دروع القارات. والأجزاء المتحولة في الأحزمة الجبلية الحديثة الضخمة إذا تعرت إلى مستوى البحر، فإنه، من حيث نوع الصخور وتركيبها، يصعب التمييز بينها وبين ما يرتبط بها من جرانيت دروع القارات. وفي الواقع، كلما تعمقنا في دراسة التركيب المعقد لدروع القارات، تأكد لدينا أنها تتكون من بقايا أحزمة من بقايا أحزمة ذات طيات سالفة، كانت قد نشأت خلال المليون ونصف مليون العام الأولى من تاريخ الأرض. وإذا شئنا أن ندرك كيف نشأت القشرة الواقعة تحت القارات فلا يجوز أن نقتصر على دراسة هذه البقايا المتعرية، بل يجب أن ندرس أيضاً أحزمة الجبال المطوية الحديثة الموجودة حالياً.

قبل أن يصبح علم الجيولوجيا علماً منظماً، وقع بطريق الصدفة كشف بالغ الأهمية بمنطقة «الانديز» في «بيرو»، وهي واحدة من أكبر أحزمة الجبال ذات الطيات الحديثة. ففي عام ١٧٤٠ بينما كانت بعثة فرنسية موفدة إلى بيرو لقياس طول قوس من خط الزوال اكتشفت أن ميل خط المطمار ضئيل جدًا بالنسبة لقوة الجذب التثاقلي لمرتفعات الأنديز، ولاحظت أن النقص المشاهد في ميل الخيط كان أقل من المتوقع في وجود مثل هذه الزيادة في الكتلة فوق السطح. وكان مكتشف هذه الظاهرة هو العالم الرياضي «بيير بوجيه» (Pierre Bouguer) الذي استنتج أن صخور هذه الجبال وما يقع تحتها إلى مسافات محدودة أخف من الصخور المحيطة بها. وقد ظن «بوجيه» أن ذلك قد يكون ناشئاً عن تمدد الصخور العميقة بتأثير الحرارة.

بعد مائة عام من اكتشاف «بوجيه» تدعم استنتاجه بما لاحظه الفلكي الانجليزي «جورج ب. أيري» (George B. Airy) من نقص في قوة الجذب التثاقلي بالنسبة لجبال الهيمالايا. فالصخور التي تعلوها جبال تكون أقل كثافة من الصخور المحيطة بها. وافترض أيرى أن صخور القشرة الجرانيتية الخفيفة تمتد تحت الجبال إلى مسافات عميقة خلال الطبقة البازلتية التي تليها والتي تفوقها كثافة. ومن خلال الاقتراح انبثقت فكرة أن للجبال «جذورًا». واقترح أيرى أن الجبال «وجذورها» تطفو فوق ما يحيط بها جبل الجليد فوق الماء. وكلما قل وزن الجبل كلما طفا أعلى.

وفي الأعوام الأخيرة أثبتت الأساليب الحديثة الدقيقة لقياس القيم المحلية للجاذبية بصفة قاطعة أن قيمة الجاذبية تقل بوجه عام كلما ازداد ارتفاع السطح، غير أن النقص المشاهد في قيمة الجاذبية أكبر مما يمكن أن يعزي إلى مجرد الارتفاع عن سطح البحر. ويطلق التعبير «فرق بوجيه للجاذبية» على الفرق بين القيمة الحقيقية المشاهدة للجاذبية والقيمة النظرية المتوقعة على فرض تساوي كثافة الصخور جميعاً. ويبين الشكل (٥) قطاعات فرض تساوي كثافة الصخور جميعاً. ويبين الشكل (٥) قطاعاً تثاقلياً يعبر عن فروق بوجيه عبر جبال الألب الشرقية. ففي هذه المنطقة جميعها نجد أن الجاذبية عند أي مكان أقل مما يجب أن تكون عليه إذا افترضنا أن الكثافة في هذه المنطقة تساوي متوسط الكثافة في المناطق غير الجبلية. وأهم من ذلك أن الفرق في الجاذبية يتزايد بتزايد ارتفاع السطح، ويبلغ هذا الفرق أقصاه عند قمة الجبل، وهذا في الواقع يوحي بوجود «جذر» للجبل. وتمدنا الدراسات السيسمولوجية بدليل حاسم. فالواضح أن سرعة انتقال أمواج الزلازل عند المستويات العميقة تحت القشرة في جبال الألب الشرقية أقل منها عند مثل هذه الأعماق في المناطق الأخرى، مما يدل على أن الصخور الخفيفة (والتي تنتقل فيها الموجات ببطء) تمتد عميقًا إلى أغوار تكون عادة مكونة من صخور أكثر كثافة. وبعبارة أخرى، فإن لجبال الألب «جذرًا» جرانيتيًا. والأمر كذلك بالنسبة لمناطق الجبال الحديثة ذات الطيات التي تمت دراستها.

هل «تطفو» هذه الجذور الجبلية في المواد البازالتية الأثقل منها وفي المواد الصخرية فوق القاعدية، أم أنها أشبه بجذور الأسنان في الفك؟ تتعذر

الإجابة على هذا السؤال بأي طريقة جيوفيزيائية معروفة. على أن الإجابة يمكن أن تتوفر فقط بدراسة الجبال نفسها.

وتمدنا «السيرا نيفادا» بكاليفورنيا بالولايات المتحدة بمثال ممتدد لمنطقة حديثة العهد بجبال ذات جذورية جرانيتية واقعية كما تعتبر المنطقة أيضاً نموذجاً من أفضل النماذج لحالة غزو الجرانيت للطبقات الرسوبية. وهنا، كما في جميع الجبال الحديثة ذات الطيات، لابد وأن تقع صخور أساس ما قبل العصر الكمبري على عمق أميال كثيرة تحت السطح. وتتكون المنطقة من طبقات رسوبية بحرية، وخاصة الطفلية التي أحالتها الضغوط إلى شكل معقد وطيات متقاربة. غير أن أكثر من نصف الطبقات التي ترسبت هناك قد اختفت تماماً، وحل الجرانيت محلها، حيث يؤلف القلب الداخلي المترامي الأطراف لمنطقة السييرا نيفادا. من أين أتى الجرانيت، وأين اختفت الرواسب؟

الجواب التقليدي على السؤال الأول مضلل في بساطته. فمنذ مولد علم الجيولوجيا قد اعتبر من البديهيات أن الطبقة السطحية للقشرة الأرضية تتكون أصلاً من الجرانيت، وأن الجرانيت يؤلف الأساس الذي ترتكز عليه جميع الطبقات الرسوبية. وفي فحوى النظرية التقليدية أن عملية الضغوط الجانبية على القشرة، والتي تكون الجبال، تدفع الجزء الجرانيتي من القشرة إلى أسفل ليؤلف جذراً صلباً، وإلى أعلا وهو منصهر ليزيح الطبقات الرسوبية السميكة في الحزام الجبلي.

وينطوي هذا الأمر على خصائص مزدوجة يشوبها شيء من الغرابة. فلكي تطفو المنطقة الجبلية الحديثة، يجب أن تكون الجذور الجرانيتية قادرة على أن تحتفظ بشكلها وأن تقاوم التشكل لدرجة كبيرة أكثر مما تفعل الصخور البازالتية الواقعة تحتها. غير أنه في الأعماق الضحلة وعند درجات الحرارة والضغوط المنخفضة ينصهر الجرانيت نفسه ويحل محل أحجام ضخمة من الطبقات الرسوبية بعد أن يدفع بها إلى أسفل بعيداً عن الأنظار. ولا نعلم من الخصائص ما يستقيم وهذا التصرف المزدوج. فحيثما وجدت الصخور البازالتية والصخور الجرانيتية متشكلة جنباً إلى جنب في الأجزاء التي تعرت إلى عمق كبير في سطح الأرض نجد أن الصخور الجرانيتية ألين عوداً من الأخرى. وعلاوة على ذلك فإن درجة انصهار الصخور البازالتية أعلى منها للصخور الجرانيتية.

ولهذا يتحتم علينا أن نفترض أنه عندما يتكون جبل حديث نتيجة للضغوط الواقعة على القشرة السطحية للقارة فإن الجزء الجرانيتي الابتدائي يدفع إلى أسفل ليندمج في جزء القشرة البازالتي الذي يفوقه صلابة وكثافة، ليكونا كتلة لدنة. وفي هذه الحالة يمكن للجذور أن تتكون، غير أنها ليست بالجذور التي تطفو في ما يحيط بها من المواد. وكل ما يحدث هو أن الجرانيت سوف يزيد من نسبة القشرة الصلبة اللدنة في هذا المكان أكثر مما يفعل في الأماكن الأخرى.

أصبحنا غير واثقين من أن الجرانيت كان عند نشأة الأرض يؤلف جزءاً أساسياً من القشرة فتلك البديهية الراسخة من بديهيات علم

الجيولوجيا تتحداها الآن حجة من أبرز الحجج في علم الصخور المعاصر. وللموضوع صلة بالسؤال الثاني الذي أوردناه: أين اختفت الطبقات الرسوبية عندما حل الجرانيت محلها؟

تبين هذه الخريطة منخفضات ومرتفعات صخور الأساس التي ترجع إلى عصر ما قبل الكمبري، وذلك في منطقة البحيرات الكبرى. وفي المساحة المظللة يبدو الصخر عند السطح. وفي المساحة البيضاء بقع الصخر تحت السطح عند الأعماق المبنية بخطوط تساوي الانخفاض ويبلغ عمق الأساس أكثر من ميل في المنطقة الواقعة تحت متشيجان الوسطى.

وقد حل الجرانيت محل الطبقات الرسوبية في السييرا نيفادا إلى ارتفاع ثلاثة أميال فوق سطح البحر، في منطقة تبلغ حوالي ٤٠٠ ميلاً طولاً، ويصل عرضها في بعض المواضع إلى ٧٠ ميلاً وتدل الخرائط المفصلة على أن الجرانيت لم يحتل مكانة رفيعة واحدة فالجرانيت في غزوه للطبقات الرسوبية قد تقدم على دفعات ننتابعة متسلسلة، والعلاقات التركيبية المشاهدة ليست بالنوع الذي يتوقعه المرء إذا كان ما حدث هو مجرد دفع الجرانيت للطبقات الرسوبية جانباً. فهو يبدو وكأنه نحت له موضعا وسط هذه الرواسب. فكل كتلة جرانيتية كبرى تقع في حزام من الصخور الرسوبية المتحولة، أما المنطقة المحيطة بها فتبدو موادها الجرانيتية وكأنما قد رشحت ما حولها من الصخور بطريقة معقدة. وفي مثل هذه المناطق المتطرفة نجد أن الصخور الجرانيتية التي يتراوح سمكها بين آلاف الأقدام، والرقائق الدقيقة في سمك الورقة تتشابك، وتتقاطع عبر منطقة وأخرى في

شكل قوائم أو سدود نارية. وحتى في المساحات الواقعة بين هذه الرقائق والسدود، نجد أن بوتاس وصودا «الفلسبار» (وهو ضرب من الصخور الجرانيتية) متناثرة بانتظام على شكل بلورات مكتملة المعالم وحديثة التكوين، أو مجموعات من هذه البلورات منتشرة في غير انتظام وتشغل البلورات الحيز الذي كانت الصخور الرسوبية تشغله قبلاً، غير أنه ليس هناك ما يدل على أنها أقحمت في مكانها هذا بالقوة. ولابد أن تكون قد تبلورت من الطبقات الرسوبية الأصلية، بعد أن أضيفت إليها نسب صغيرة من القلويات، وربما أيضاً من السيليكا وهي في حالة غازية أوذائبة. وتدل الدراسات المفصلة في علم الصخور، بما لايدع مجالاً للشك المعقول، على أن أجساماً كاملة من الجرانيت قد تكونت بمثل هذه العمليات، وتسمى بعمليات «التجرنت» (Granitigation).

وتحول الطبقات الرسوبية، وحتى الحمم البركانية، إلى جرانيت أمر تقوم عليه الدلائل المقنعة، حتى أن أحدًا من المشتغلين بعلم الصخور لا يستطيع أن ينكر الآن بعض الجرانيت قد تكون بعملية التجرنت. والسؤال الآن هو: كم من الجرانيت الموجود بالأرض قد تكون بمثل هذه العمليات، وكيف تتم هذه العمليات؟

هناك مذهبان في التفكير في هذا الصدد. ويعتقد أصحاب المذهب القديم أن الجرانيت هو العامل المساعد في عمليات التجرنت المحلي، بينما يذهب المعارضون، أي أصحاب المذهب الثاني، إلى أن الجرانيت ما هو إلا النتاج النهائي لعملية التجرنت. ويعتقد الفريق الأول أن الكتل الجرانيتية

في الحالات النموذجية ليست أكثر من أجزاء من الجرانيت الابتدائي بقشرة الأرض، وأن هذه الأجزاء قد انصهرت في أماكنها مرة ثانية ثم وصلت إلى مواضعها الحالية بإزاحة الصخور الأخرى ميكانيكياً، وينفي هذ الفريق جدوى عملية التجرنت الكيميائي مصادفة عند أطراف الكتل الجرانيتية. ويرى الفريق الثاني أن القشرة الابتدائية للأرض كانت مكونة من البازلت وأن الكتل الجرانيتية قد نشأت من تحول الطبقات الرسوبية. ويفترض هذا الفريق أن العملية تجري كما يلي: أيان تنشأ الجبال ذات الطيات عند السطح بسبب تمزق القشرة الأرضية، وتولد الاجهادات والحرارة الاحتكاكية عند المستويات العميقة، فإن الغازات الساخنة والمحاليل التي تحمل السيليكا والقلويات وغيرها من العناصر تنبعث إلى السطح من الأجزاء العميقة من القشرة أو من الطبقات الواقعة تحتها. وهذه «الانبعاثات» تحول البازلت إلى صخور أكثر توفراً بالسيليكا، وتحول الطفل والأحجار الرملية إلى صخور «الشست» و «النايس» وفي النهاية إلى جرانيت.

وبما أن هذا الجدل دقيق الصلة بوجهة النظر الحديثة عن قشرة الأرض، فلنناقش الأدلة التي تؤيد أن الجرانيت نشأ عن عملية التجرنت. وأول دليل هو أنه إذا كان المواد الجرانيتية مجرد أجزاء من القشرة الابتدائية السيالية السائلة لكانت هذه المواد خليقة بأن تتواجد خارج مناطق الأحزمة الجبلة كما هو الحال في البازلت وما يمت إليه من الحمم البركانية. غير أننا لاتعثر أبداً على الجرانيت خارج مثل هذه الأحزمة. ويفسر أصحاب المذهب التقليدي ذلك بان المواد السيالية المنصهرة لزجة جداً

بحيث لا تتحرك بسهولة مثل المواد المافية المنصهرة. والمنصهرات السيالية لزجة حقاً، ولكن إذا كانت اللزوجة هي التي تمنعها من أن تتحرك مثل البازالت، فلماذا ينجح الجرانيت في التسرب إلى الفجوة الشعرية الموجودة بالصخور الرسوبية ليحولها تحويلاً كيميائياً ؟ ولا يمكن أن نجد وجهاً للمقارنة في حالة البازالت الأقل لزوجة عندما يتخلل الطبقات الرسوبية؟ فمن أبعد الاحتمالات أن تتسرب المواد الجرانيتية المنصهرة يحدوها شيء من العنف داخل طبقة أثر أخرى، خلال طبقات شست الميكا الرقيقة (وهي ضرب نموذجي من الصخور المتحولة). لكي تكسبها هذا التركيب المميز لها.

وفي حوزة المؤلف عينة من الصخر تبين أن عملية التبلور يمكن أن تنشأ عنها تلك العلاقات التركيبية المميزة والتي نجدها بين الجرانيت الدخيل والصخر الذي أقحم الجرانيت عليه، وهو في حالتنا هذه طفل متحول. وتحتوي عينة الصخر على رقائق جرانيتية تبدو كما لو كانت حقيقية بين طبقات الطفل، وسدود تخترقها متعامدة أو في اتجاه الوتر. وتتصل الرقائق والسدود بالجسم الأصلي للمادة التي تبدو أنها داخلية. غير أن دراسة المنطقة تبين بشكل قاطع أن عينة الصخر الموجودة عليها مادة ما أو تحقن بطريق العنف بمادة سائلة، وفي حقيقة الأمر، لم يكنْ هناك انصهار على الإطلاق، فهذه المادة الخفيفة عبارة عن طفل تبلور تحت تأثير الحرارة التي استمدها من طبقة من البازالت.

في هذه العينة تتمثل عقدة مشكلتنا. وكما أن أحداً لا يعترض على عملية التجرنت على نطاق ضيق، غير أن معظم الجيولوجيين وقفوا حائرين عند تطبيق هذه العملية على الكتل الجرانيتية الكبيرة. ذلك بالرغم من أن جميع تفاصيل نموذجنا المصغر يمكن أن تنسق على نطاق تقريباً في المناطق الجرانيتية النموذجية. ونحن مقيدون بالمدى الذي تجري عليه العملية المطلوبة.

ومع كل فإننا نواجه حقيقة لا محيص عنها، تلك هي أنه في جميع الأحزمة الجبلية قد ظهرت ساحات جرانيتية مترامية الأطراف في نفس المواقع التي اختفت فيها ساحات كبيرة من الطبقات الرسوبية، وفي معظم الأماكن نجد أن نظتم تركيبها يدل على أن إزاحة الرواسب بطريقة ميكانيكية أمر بعيد الاحتمال جداً، إن لم يكن مستحيلاً. وعلاوة على ذلك فإن هذه الكتل الكبيرة من الجرانيت البديلة لا توجد إلا في هذه الأماكن من قشرة الأرض (أي الأحزة الجبلية) حيث تمت تشكيلات ميكانيكية ضخمة هذه العمليات لابد أن تتولد عنها حرارة، وأن تحدث في الصخر ممرات تتسرب فيها «الانبعاثات» التي يعتقد أن لها دوراً في عملية التجرنت

وهناك أخيراً تلك الحقيقة الغريبة، وأعني بها أن ما يزيد على نصف القشرة الأرضية – تحت البحار – ليس بها في الظاهر طبقة جرانيتية سطحية. وعلينا نحن معشر الجيولوجيين مواجهة إيضاح سبب عدم وجود هذا الجزء الكبير من مادة تعودنا أن نعتبرها جزءاً عاماً من المواد التي كانت

تكون القشرة الأرضية. ولقد بدأ كثير منا يعتقد أنه من الأجدر بنا أن نتساءل «لماذا يوجد الجرانيت بالقارات؟» بدلاً من أن نسأل «لماذا لا يوجد الجرانيت في قاع المحيطات؟».

ويبدو للمؤلف أن هذا الجدل قد بلغمن الوجاهة حداً يحملنا على أن نعيره اهتمامنا. ومع كل فعملية التجرنت على نطاق عالمي شامل لا تزال مجرد فكرة جريئة. و«الانبعاثات» من تحت القشرة الأرضية أمر غامض لم يجز بعد قبول التفكير الجيوكيميائي، ولا يقره بعض الثقاة في عالم الصخور. غير أن معلوماتنا عما يحدث للمواد تحت الضغوط وعند درجات الحرارة الشديدة الارتفاع لا تزال في دور البدء. والحقائق المتجددة التي يكشف عنها الجيوفيزيائيون تجعل نظرياتنا عن المادة المجهولة تحت القشرة في تغير مستمر. ويبدو حالياً كما لو أن فكرة التجرنت تلائم اللغز المعقد لتركيب القشرة أكثر مما تلائمه النظرية التقليدية.

لقد ناقشنا التغيرات في القشرة الأرضية التي تقع في منطقة الأحزمة الجبلية الحديثة. وتبين مساحات الطبقات الرسوبية بالقارات بطريقة غير مباشرة أن ثمة تغيرات في القشرة، وما ينجم عن هذه التغيرات من تحركات في هذه القشرة، يحدث حتى خارج هذه الأحزمة. وتتموج أسطح هذه المساحات من الطبقات الرسوبية في القارات وتشاهد بها منخفضات غير منسقة تفصل بينها مرتفعات معتدلة. وتتوسط النصف الشمالي للقارة الأمريكية عدة منخفضات (مثل منخفضي ميتشيجان وايلينوي — كينتوكي)، ويبلغ قطرها بضعة مئات الأميال ويبلغ عمقها ميلاً أو ميلين

(أنظر الشكل (٧)). أما المرتفعات التي تفصلها فيعتبر «سينسيناتي آرك» خير مثال لها.

ونحن لم نول بعد أسباب هذا التموج إلا القليل من اهتمامنا. وكنا نميل إلى أن نعزو ذلك إلى الطبقات الرسوبية إذا كانت النظرية السائدة هي أن القشرة الأرضية أسفل القارات ضعيفة لدرجة أنها تتداعى من جراء الأثقال المحلية، وعلى هذا فإن ثقل الرواسب المتراكمة فوقها يجعلها تغور إلى أسفل مكونة المنخفضات. غير أن البيانات العديدة التي حصلنا عليها بقياس الجاذبية في الأعوام المنصرمة تدل دلالة قاطعة على أن القشرة المذكورة أقوى كثيراً مما كنا نفترض. ويسود التوازن الاستاتيكي بمعناه العام فقط في المساحات المترامية الأطراف. فلو كانت القشرة ضعيفة لكان كثير من المنخفضات الصغيرة وخاصة منخفضاً «بج هون» و«بودر ريفر» بمنطقة «روكي ماونتن» أكثر ارتفاعًا مما هي عليه الآن، إذ أن وزنها خفيف نسبياً، ولرأينا المناطق الجبلية المتاخمة أقل ارتفاعًا إذ أن وزنها أكثر من اللازم. وفي هذه الحالات لابد أن تكون القشرة من القوة بحيث تتحمل الإجهادات المحلية الكبيرة. وهناك أدلة على أنه بالنسبة لأكبر منخفضات وسط القارة الأمريكية، لا يمكن أن نعزو وجودها إلى الرواسب الموجودة بها. ولابد أن يكون هبوط سطح الأرض التي تتكون عنده المنخفضات ناشئاً عن عمليات تقع عند الأعماق. وإلى أن نعرف ماهية هذه العمليات، لا يمكننا أن نؤمل في حل أكبر المشاكل جميعاً، ألا وهي كيف تكون قاع المحيطات.

ويقع سطح صخور ما قبل عصر الكمبري في المنخفضات الصغيرة من الطبقات الرسوبية في القارات عند عمق يتراوح بين ميل وأربعة أميال تحت سطح البحر، وتلك هي أعماق المحيطات. فهل يعني هذا أن بعض أجزاء القاع الحديث للمحيط لا تعدو أن تكون أجزاء من قارات قديمة هبطت إلى أسفل؟ بهذا السؤال نعود إلى تركيب القشرة الأرضية تحت المحيطات.

على سواحل القارات الممتدة حول المحيطات الأطلنطي والهندي والمتجمد الشمالي والجنوبي وعلى بعض سواحل المحيط الهادي تمتد المعالم التركيبية للقارات إلى ما تحت البحر كما لو كان السطح حقاً قد اعتراه انحناء أو انشطار. وتنتهي هذه المعالم انتهاء مفاجئاً في الخريطة الجيولوجية. وإنك لتجد على الضفتين المتقابلتين للمحيط نفس الأنواع أو أنواع متشابهة من الكائنات البحرية التي تعيش بالمياه الضحلة، ومن الحيوانات والنباتات الأرضية. مما يدل على أن هاتين الضفتين كانت تصلهما من قبل مياه ضحلة أو أرض يابسة حيث يوجد الآن البحر العميق. وقد دعتْ مثل هذه المشاهدات كثيرين من الجيولوجيين في القرن التاسع عشر إلى أن يستنتجوا أن أجزاء كبيرة من القارات أو قارات بأكملها قد هبطت خلال التاريخ الجيولوجي إلى أعماق المحيط.

تدل الشواذ في الاتزان الاستاتيكي فوق منخفض «بج هورن» (إلى اليسار) وجبال «بج هورن» (في الوسط) على حدوث عمليات عن الأعماق أدت إلى تعرج سطح صخر الأساس (المظلل بخطوط مائلة).

والشذوذ في الاتزان الاستاتيكي هو الاختلاف عن القيمة المتوقعة للجاذبية (مقاسة بالملليجال عند القمة) بعد إدخال تصحيح تساوي ضغط القشرة عند عمق معين. ويبين منحنى الجاذبية أن المنخفضات أخف مما يجب وأن السلسلة الجبلية أثقل مما يجب.

وفي عام ١٨٤٦ افترض الجيولوجي الأمريكي جيمس د. دانا (James D. Dana) **لأول مرة عكس هذا الرأي: ذلك أن القارات قد ظلت شامخة منذ فجر التاريخ الجيولوجي. اعتقد دانا أن القارات كانت جزءًا من القشرة التي تجمدت في وقت مبكر، ومن ثم كانت أكبر سمكًا، وعندما تقلصت الأرض لم تغص القارات إلا قليلاً، بينما تكونت المحيطات في الأجزاء التي كانت قشرتها أقل سمكًا. وفيما بعد، حين أصبح معلوماً أن البازلت هو الصخر الغالب في جزر المحيطات، بينما يغلب وجود الجرانيت في القارات والجزر القريبة منها، توصل كثير من الجيولوجيين إلى نفس استنتاج دانا، غير أنهم بنوا استنتاجهم على أسباب تختلف عن تلك التي استند إليها دانا. ولما كانت أجزاء القشرة تبدو في توازن تثاقلي، فقد اعتقدوا أن قاع المحيط منخفض لأنه يتكون من صخور ثقيلة، بينما ترتفع القارات لأنها تتكون من صخور خفيفة، ومتى تكونت القارة ظلت على الدوام قارة كما هي. غير أن هذا يدعنا أمام عالم من الحقائق المفتقرة إلى تفسير، وهي حقائق قادت آخرين إلى عكس هذه الاستنتاجات.**

من ٤٠ عامًا وضع أستاذ الفيزياء الأرضية الألماني. «الفريد فيجنار» (Alfred Wegener) **نظريته الخارقة عن إزاحة القارات. فقد افترض**

في بساطة، متجاهلاً كل الأدلة الفيزيائية والجيولوجية الممكنة، أن البازلت في قاعالمحيطات من الضعف بحيث لا يستطيع مقاومة التشكل بفعل القوى مهما تناهت في صغرها. ولهذا يتسنى للكتل الجرانيتية بالقارات أن تزاح وهي عائمة في بازالت قاع المحيط كأزاحة قطع الثلج في الماء. وفي رأي «فيجنار» أن البحر يفصل بين كتل كبيرة من اليابسة كانت متصلة من قبل، وأن البازالت الصلب الموجود الآن بقاع البحر كان يطفو من قبل في غير مرونة في الحيز الذي يشغله الآن. وقد أطلق «فيجنار» العنان للخيال في كتابه الذي يعتبر آية في الحجة والإقناع، وبضربة واحدة جريئة يبدو أن «فيجنار» وجد حلاً لعدد من المشاكل المبهمة في جيولوجية العالم. وقد كانت لأعمال فيجنار آثارها في أن تقرب إلى أذهان كل من يعنيهم الأمر مبلغ حاجتهم إلى الجديد والدقيق من المعلومات عن الخواص الفيزيائية للصخور، وطبوغرافية قاع المحيط وتركيب طبقاته. وقد بدأنا نحصل على بعض المعلومات البالغة الأهمية عن جيولوجية قاع المحيط وذلك بفضل الأعمال التي تجريها نخبة قليلة من جهابذة الباحثين الأكفاء، في مقدمتهم «ف. أ. فيننج ماينز» الهولندي و«موريس أيوينج» من جامعة كاليفورنيا.

وفي الأعوام الأخيرة قبيل الحرب العالمية الثانية، عني «أيوينج» بتحديد كيفية اتصال القشرة الجرانيتية في القارة الأمريكية الشمالية بقاع البحر العميق على امتداد الحدود الغربية لشمال حوض الأطلنطي. فعند الساحل الأطلنطي للولايات المتحدة ينحدر قاع البحر في أول الأمر انحدرًا بطيئًا جدًا مكونًا رفًا قاريًا (Continetal Shelf) يصل عمقه عند حافته الخارجية إلى حوالي ٣٦٠ قدمًا تحت سطح البحر، وعلى بعد يتراوح

بين ٦٠، ٨٠ ميلاً من «نيوجيرسي» و«ماريلاند». وبعد الحافة ينحدر القاع انحداراً نسبياً (بمعدل حوالي ٤٠٠ قدم لكل ميل). نحو أعماق البحر مكونًا المنحدر القاري.

سؤالان واجههما أيوينج: (١) ما الذي أقام الرف القاري؟ (٢) إلى أي شيء تؤول القاعدة المتبلورة السيالية (الجرانيتية) عندما يتجه المرء نحو أعماق المحيط؟ افترض «فيجنار» أن القشرة الجرانيتية القارية تنتهي عند الحافة الخارجية للرف، وهي الحد الفاصل الذي عنده انتزعت منه القارة الأوربية. وإذا كان هذا صحيحاً فلابد أن القشرة تحت الرف تتكون من صخور الأساس. وتغطي هذه الصخور قشرة رقيقة من الرواسب الحديثة، ويتنهي هذا التركيب نهاية مقتضبة.

وللإجابة على هذا السؤال المزدوج، استخدم «أيوينج» الطريقة السيسمولوجية للرصد تحت البحر بعد أن أدخل عليها كثيراً من الأفكار الفذة في حد ذاتها قصة مثيرة. وقد بين «أيوينج» أن القاعدة الجرانيتية لا تنتهي عند الرف القاري، بل تستمر منحدرة إلى أعماق تناهز الميلين تحت سطح البحر. كان هذا اكتشافاً ذا أهمية بالغة إذ يبين أن الصخور البلورية الكائنة عند حافة القارة، لها نفس صفات الصخور القديمة بالدرع القاري، وأنها تنحدر مكونة حوض البحر بنفس الوقت التي ينحدر بها الدرع القاري مكوناً منخفض ميتشيجان الذي يتوغل إلى مسافة ٧٠٠ ميل وسط القارة. وتغطي الرواسب القاعدة المنحدرة لشمال الأطلنطي كما هو الحال في منخفض ميتشيجان. وهذه الرواسب امتدت للتركيب

المشاهد في السهل الساحلي. ويثبت هذا الكشف أن أجزاء من البحر العميق ربما كانت من القشرة القارية ثم هبطت إلى مستوى منخفض وظلت حيث هي. والمفروض أن هذا قد تم بواسطة نفس العمليات المجهولة التي تكونت بها المنخفضات داخل القارات.

كم جزءاً من قاع المحيط له مثل هذا التاريخ؟ لعل خير ما نجيب عليه في وقتنا هذا هو أن جزءاً صغيرًا فقط من «الحوض الأمريكي الشمالي» للمحيط الأطلنطي يحتمل أن يتوسد النوع القاري من المادة القشرية. ويتعارض هذا الرأي مع المعتقدات السائدة. فسرعة انتقال أمواج الزلازل عبر قاع المحيطات توحي بأن كل قاعات المحيطات، فيما عدا الجزء الأوسط من المحيط الهادي، تغطيه طبقة من الجرانيت لا يعدو سمكها ستة أميال. بيد أن «أيوينج» ومساعديه استنبطوا نظرية جديدة لانتقال الموجات السطحية للزلازل على طول قاع المحيط، وهذه النظرية ولو أنها لا تستلزم نفي وجود المادة القشرية «القارية» فوق قاع المحيط الأطلنطي الشمالي، إلا أنها تعتبر وجودها أمراً غير لازم وقد أثبتت الأرصاد السيسمولوجية المباشرة لانكسار الموجات والتي أجراها أيوينج مؤخراً عند أكثر من اثني عشر موضعًا في المحيط الأطلنطي الشمالي أن السرعات المشاهدة هي السرعات التي تتميز بها الصخور البازالتية. وعلاوة على ذلك فقد أدت قياسات الجاذبية التي أجراها «فيننج ماينيز» عبر شمال الأطلنطي إلى نفس النتائج: وتدل تلك القياسات على وجود شواذ موجبة تثبت عدم وجود مادة جرانيتية خفيفة.

ومن هذه الاعتبارات يبدو ممكناً أن القشرة الكائنة تحت شمال الأطلنطي وتحت أجزاء كبيرة من المحيطات الأخرى تتكون كلية من البازلت دون أي مادة سيالية. ومما يذكر أن «فيجنار» بنى نظريته عن إزاحة القارات مفترضاً صحة هذه الحالة. ولكن ما هي خصائص هذا البازلت؟ فالبازلت، طبقاً لنظرية «فيجنار» لابد أن يكون ضعيفاً بحيث يتداعى أمام الضغوط الصغيرة جدًا. وهذا يعني أن البازلت لابد أن يتكون أساساً على شكل مسطح: فهو لا يقوى على تحمل وزن التلال والجبال. فما هي الحقائق التي لدينا؟

في صيف عام ١٩٤٧ بدأ «أيوينج» في إعداد خريطة منظمة لطبوغرافية قاع شمال الأطلنطي مستخدمًا أجهزة صوتية حديثة، يستقبل بها صدى الصوت في باخرة الأبحاث «أتلانتس». وما كنا نعلمه من قبل بوجه عام يدعمه هذا البحث بنوع من التفصيل الدقيق: ذلك أن سطح قاع البحر هو على العكس تماماً مما تتطلبه نظرية «فيجنار». فقاع المحيط ذو طبوغرافية وعرة. فمن السطح المنبسط لحوض أمريكا الشمالية عند قاع الأطلنطي الذي يزيد عمقه على خمسة أميال تحت سطح البحر، ترتفع جبال عالية (جبال بحرية) يصل ارتفاعها في بعض الحالات إلى أكثر من ٦٠٠٠ قدم. وكثير من هذه الجبال الواقعة تحت سطح البحر ذات قمم مدببة، بينما تستوي قمم بعض الجبال. الأخرى وفي المنطقة الواقعة بين أيسلاند جنوباً، والمحيط المتجمد الشمالي، يمتد تحت البحر حزام من الجبال المعقدة تعرف باسم «جرف الأطلنطي الأوسط»، والجزء الأوسط من هذا الجرف على شكل ربوة وعرة يتراوح عرضها بين ٦٠ ميلاً، ٢٠٠ ميل،

ولها قمم ترتفع إلى أقل من ميل واحد تحت سطح البحر. وعلى جانبي هذه الربوة يمتد طرفاً الجرف في أسطح مائلة تتوسدها طبقة سميكة من الرواسب غير المتماسكة توحي بوجود فوالق بين كتلتها المائية. وقد استخرج أيوينج كتلا بازالتية كبيرة من سفح مرتفع بحري شديد الانحدار، لا يعدو أن يكون سطح انفلاق – وهناك من المعالم الأخرى في الأطلنطي الشمالي ما يوحي بأنها ناتجة عن تصدع. ومن المحتمل أن حافة الرف القاري قد نشأتْ عن منطقة تصدع هبط أزاءها إلى مستوى قاع البحر العميق النصف الثاني من حوض الترسيب الذي افترضه أيوينج في قطاعاته المستعرضة.

وتلك الصورة كبيرة الشبه بما يتميز به قاع المنطقة المتوسطة الكبرى بالمحيط الهادي، الذي يبدو أنها تتكون كلية من البازالت وما إليه من الصخور. فقد عثر هناك على كثير من الجبال ذات القمم المستوية. وجزر هاواي ليست إلا قمماً لسلسلة بازالتية كبيرة تتصاعد إلى ما فوق مستوى سطح البحر من قاع المحيط الذي يزيد عمقه على ثلاثة أميال. وتوحي طبوغرافية قاع البحر المحيط بالمنطقة بأن قوى المرونة بالقشرة هي التي تتحمل ثقل سلسلة الجبال البحرية، وهي حالة تشبه إلى حدج ما حالة الوزن الذي تتحمله طبقة من الجليد تغطي جسماً من الماء. وتلك القابلية على تحمل الأثقال الكبيرة المحلية تدل على وجود قشرة سميكة قوية – وذلك بعكس الشروط التي يتطلبها «فيجنار».

وموجز القول هو أن كل ما نعلمه الآن عن شكل قاع المحيط وتركيبه يثبت إثباتاً حازماً أن نظرية «فيجنار» عن إزاحة القارات قد تداعت من

أساسها. كما يوحي أيضًا بأن «دانا» لو يجانبه الصواب حين أعلن أن القارات تكونت في الأجزاء الغليظة من القشرة. والواقع أن القشرة تحت القارات تبدو أقل سمكاً وأضعف منها تحت البحار.

وتعتبر القشرة تحت المحيطات جزءاً من الأرض الصلبة فهي بمثابة «الدرع»، حكمها في ذلك حكم القشرة الكائنة أسفل القارات إن لم تكنْ أقرب إلى هذا الفرض. وإذا كانت هذه هي الحال، فإن العمليات التي تجري بالقشرة في الجزء القاري، لابد أن تكون جارية أيضاً بالقشرة البحرية. ثم هل يمكننا في ضوء هذه العمليات أن نفسر التباين بين سطح الأرض؟ إن المؤلف يعتقد أن ذلك في الإمكان. ولنبدأ بالنوعين الرئيسيين من التشكل الموجود بالقارات إذ نجدهما أيضاً في قاع المحيطات. وأحد هذين النوعين هو تعاقب المنخفضات والمرتفعات. ويتميز قاع الأطلنطي بتموج سطحه. فنجد «المنخفض – والمرتفع» الذي تنسم به، من ناحية المبدأ، الهضبة الرسوبية في منتصف القارة الأمريكية الشمالية، غير أن هذا التموج يتمثل على نطاق أضخم في قاع المحيط. والنوع الآخر من التشكل هو ذلك الذي تنشأ عنه سلاسل الجبال ذات الطيات. وأكبر ما تطورت إليه هذه العملية على وجه الأرض يتمثل فيما نجده على طول ساحل المحيط الهادي، وعند قاع النصف الغربي من المحيط نفسه، فهناك تتكون السلاسل الكبيرة لجزر المحيط الهادي من قمم الجبال الواقعة تحت الماء. وتتميز هذه السلاسل من الجبال البحرية بأنها طويلة وضيقة وغير متناسقة، وتحاذيها عن قرب أخاديد عميقة تقع على جانبها الأكثر انحداراً. ونرى هذا النوع من التشكل بوضوح في سلاسل الجزر بالجانبين الشمالي والغربي

للمحيط الهادي وفي الكورديلليرات الكبيرة بأمريكا الوسطى والجنوبية، مصحوبة بالأخاديد المتباعدة عن الشاطيء والواقعة بأعماق المحيط. وتعتبر الأحزمة الجبلية التي تحيط بالمحيط الهادي مهدًا لأكثر من ٤٠٪ من الزلازل الأرضية القريبة من السطح، وحوالي ٩٠٪ من الزلازل التي صدرت من أعماق متوسطة، وجميع الزلازل الصادرة من أعماق كبيرة. ومن ثم فإن عملية تكوين الجبال تجري هنا الآن بنشاط على نطاق واسع. (انظر الجزء التالي عن «أخاديد المحيط الهادي»).

وخير مثال لتلك المرتفعات الفعالة الحديثة ربما يكون الحزام الجبلي الجبار الممتد تحت البحر من اليابان في الشمال عبر «البونيز» و«مارياناس» ثم إلى «بالو» في الجنوب، وهي منطقة تضارع الهيمالايا طولاً وارتفاعاً. وتعرف بعض قمم هذه المنطقة بأسماء جزر «أيوجيما»، و«سابيان»، و«جوام»، و«ياب». ونجد في هذه المنطقة نفس المنظر غير المتناسق، ونفس الأخاديد الواقعة بأعماق المحيط على طول جانب المنطقة الشديد الانحدار، ونفس سلسلة البراكين بالجانب الخلفي الأقل انحداراً فهي تمثل أنشط المرتفعات المشرفة على المحيط الهادي من القارات المحيطة به. غير أن تلك المنطقة تختلف في أمرين هامين: (١) فهي ترتفع على انفراد فوق قاع المحيط العميق.(٢) والصخور المتحولة الوحيدة التي أمكن العثور عليها في الكتلة الصخرية هي صخور مشتقة من البازالت أو من أنواع أخرى من الصخور البحرية الغنية بالحديد والمغنسيوم أكثر من البازالت نفسه. ويبدو أنه لا وجود للأنواع الأخرى من الصخور المتحولة التي تتميز بها القارات (وهي تلك الصخور المشتقة من الطبقات الرسوبية

العادية، مثل الطفل والحجر الرملي). فهنا إذن منطقة جبلية حديثة يبدو أنها نشأت نتيجة لتشكل قاع المحيط، وهي تضارع في ضخامتها أي منطقة جبلية أخرى على اليابسة.

لنفترض أن المحيط غير موجود وأننا نقف فوق القاع المنخفض للمحيط الهادي متجهين بأنظارنا غرباً نحو هذه المنطقة الجبلية المتشامخة. فمن ورائها غرباً يقع سهل بحري يمتد إلى أكثر من ٦٠٠ ميل. وعند الطرف الأقصى من هذا السهل ترتفع بنفس الطريقة تماماً سلسلة الجبال الضخمة التي تؤلف جزر الفلبين، ومن خلفها تبرز القارة الأسيوية نفسها، مغطاة برواسب حديثة. وقد يبدو غير ذي موضوع بعد هذا التصوير، أن يتساءل الإنسان: «كيف يتسنى لأحواض المحيطات أن تتكون؟»، وقد يكون من الأوفق أن يستعيض عنه بالاستفسار «كيف تسنى للقارت أن تقوم في مقامها؟».

من وجهة النظر هذه، يصبح التعبير «حوض البحر» غير ذي معنى، ويمكننا الآن ننظر إلى القارات بوضوح على أنها أحزمة تشكيلية اعترت سطح الأرض وتكونت على فترات خلال الأزمنة الجيولوجية، واتصلت بعضها بالبعض الآخر بطرق شتى. وتكون المساحات البحرية، من الناحية الأخرى، هي الجزء من سطح الأرض الذي لم يطرأْ عليه تغيير. وتلك المساحات تغطيها القشرة البازالتية الأولية، تعلوها هنا وهناك طبقة رقيقة من الرواسب المختلفة.

يختلف هذا الاستدلال كثيراً عن النظريات الجارية. والغرض من ذكره هو أن نبرز الاتجاهات الفكرية الجديدة الممكنة، وأن نقترح أماكن محددة يمكن أن تكون حقلاً لاختبار هذه الأفكار اختباراً منظماً يتولاه الجيوفيزيائيون والجيولوجيون.

وأحد هذه الأماكن المحددة هو حزام الجبال ذات الطيات «بونينز – ماريناس – بالان» وبالرغم من أن عشرات الآلاف من الأميال المربعة من القشرة تقع غرب هذه المنطقة عند مستوى قاع البحر العميق، فإن الرأي السائد الآن هو أن تلك المنطقة تحدد موقع الحافة الخارجية الشرقية للنوع «للقاري» من القشرة المنتمي إلى الجرانيت في نصف الكرة الباسيفيكي واستخلص هذا الاستنتاج من الدراسات التي أجريت على الأنواع الشائعة من الحمم البركانية التي تدفقت من البراكين العديدية بحزام الجزر. فالصخور المتكونة من هذه الحمم، هي المعروفة باسم «الانديسايت»، وتختلف في تركيبها المعدني عن أي نوع من الصخور التي يمكن اشتقاقها من الصخور التي يمكن اشتقاقها من بازالت المحيط الهادي. وتتميز هذه الصخور بارتفاع نسبة السيليكا بها. والرأي السائد في تفسير ارتفاع نسبة السيليكا بتلك الصخور. واحتوائها على بعض المواد اللابازالتية، هو أن صخور الانديسايت هذه قد نشأتْ عن اختلاط الحمم البركانية البازالتية بالمادة الجرانيتية الموجودة في الجرانيت الابتدائي التي يفترض أنها تغطي سطح القشرة حيث توجد الانديسايت. وهناك نفس النوع من الاستدلال الذي يزعم بوجود طبقة من الجرانيت الابتدائي ويفسر وجود الأجسام الجرانيتية بالرواسب المتحولة في الأحزمة الجبلية القارية.

بيد أننا رأينا هذا التفسير يقابله تفسير آخر لوجود الأجسام الجرانيتية في الرواسب القارية وهذا التفسير هو تحول أو تجرنت الرواسب بسب انبعاث السيليكا وغيرها من العناصر من المستويات العميقة. ومن الممكن أن نعزو تكون الانديسايت إلى نفس النوع من النشاط، أي ما يسمى آ بتلوث مصدر المادة البازالتية قد يعود إلى أن السيليكا وغيرها من العناصر قد تدخل على التركيب بنفس الطريقة ولنفس الأسباب كما تفعل في عملية التجرنت. وعلى هذا فإن حمم الانديسايت البركانية في المحيط الهادي قد لا تكون صورة إستاتيكية لمخلفات الماضي فحسب، ولكنها تمثل جبهة ديناميكية تجرى فيها بنشاط صياغة القشرة البازالتية القديمة في قوالب أطناف جبلية حديثة.

وعلى هذا فإن غرب المحيط الهادي يجتاز طوراً صالحاً لاختبار ثمار تطور القشرة اختباراً دقيقاً. ويجب أن تجري عملية مسح المنطقة للحصول على صورة مناسبة لطبوغرافية قاع المحيط. ويجب إجراء أرصاد سيسمولوجية ومغناطيسية وتثاقلية من أسطح السفن ومن الغواصات عن طبيعة القشرة في المناطق الجبلية الواقعة تحت الماء وعلى جانبي هذه المناطق، ويجب أخذ عينات الصخور من المنحدرات العميقة الواقعة تحت الماء. ولابد من دراسة تركيب الجزر وصخورها دراسة وافية، كما يجب تحليل الخواص الفيزيائية والكيميائية للعناصر الملائمة في حالتها الغازية والمنصهرة والذائبة.

مما تقدم نرى أن معلوماتنا عن تركيب القشرة الواقعة تحت القارات لا تزال محدودة، وهي أكثر ضآلة بالنسبة للقشرة تحت البحر. فكل آرائنا قد بنيت، بحكم الضرورة، على بيانات غير وافية لا يمكن الركون إليها. وهي لا تخرج عن كونها نظريات اجتهادية تفتقر إلى الاختبار. ومع كل فلابد أن تكون لدينا نظريات لنختبرها، ويجب أن نوالي السعي لنربط بينها في صورة منسقة عامة تبين الصلة بين جزيئاتها وبين مجموعها.

وفيما يلي نجمل الصورة التي يمكن أن نستخلصها عن قشرة الأرض من الأرصاد والأفكار الواردة بهذا الجزء من الكتاب: إن الطبيعة المعقدة للقشرة الأرضية تحت القارات ناتجة من الطيات الكبرى التي تعتري القشرة، ونعني بها تكوين المرتفعات والمنخفضات التي امتلأت بالرواسب. وقد نشأت جذور الجبال من المنخفضات الممتلئة بالرواسب نتيجة للضغوط الواقعة على هذه الأحزمة، والتي تولد عنها أيضاً نشاط العمليات الفيزيائية والكيميائية التي أحالت جزءاً من الرواسب إلى صخور متحولة، وفي النهاية إلى جرانيت. والفكرة التي توحي بأن صخور القشر الأرضية تتواجد في طبقات أفقية، ليست إلا محض إدراك إحصائي لا يمثل حقيقة الطبيعة المعقدة لتركيب القشرة.

أما الدروع وامتداداتها تحت الهضاب الرسوبية في القارات فهي عبارة عن الأجزاء التي خلفتها عوامل التعرية من المناطق الجبلية ذات الطيات القديمة، وعلى هذا فإن مستواها مقترن بمستوى البحر. ويدل وجودها على أن موقع مستوى سطح البحر بالنسبة لليابسة لم يتغير تغيراً جوهرياً

منذ العصر الكمبري. وقد تعرجت أجزاء من السطح القاري القديم الذي يرجع إلى ما قبل العصر الكمبري، مكونة مرتفعات ومنخفضات، وقد هبط القاع في بعض هذه المنخفضات إلى أعماق تناهز أعماق المحيطات.

وقد جلبت عملية تكوين الأحواض بعض القطاعات الجرانيتية القارية إلى أعماق المحيط، وذلك في المناطق الواقعة بين المساحات القارية والبحرية النموذجية. ومن الناحية، نجد أن تشكيل القشرة قد نتجت عنه أحزمة من مناطق الجبال ذات الطيات سواء من القشرة البازالتية الواقعة تحت قاع البحار أو المستويات القارية. والعمليات التي يرجع إليها وجود القارات لا تزال دائبة النشاط على حدود المحيط الهادي وفي داخل الجزء الغربي من المحيط.

هذه الخلاصة العامة ليست إلا الإطار الذي يجب أن ننسق فيما نعلمه من الحقائق عن تركيب القشرة. فهي تحدد الغرض من بعض الأسئلة الهامة التي تفتقر إلى الجواب، كما تبين الإمكانيات المثيرة للعمل في إحدى الجبهات الكبرى للعلوم، وأعني بها جيولوجية الأجزاء العميقة من القشرة الأرضية.

أخاديد المحيط الهادي

روبرت ل. فيشر وروجر ويفيل

في ٢٨ أبريل سنة ١٨٧٩ بينما كانت السفينة الملكية «باونتي» تعبر المحيط الهادي، نشب نزاع له ذكراه بين قبطان السفينة اليوزباشي ويليام بلاي William Bligh **والضابط الأول فليتشر كريستيان** Fletcher Christian**، وعلى أثر هذا النزاع انفضت صحبتهما واتخذ كل منهما سبيله في اتجاهين متضادين في البحر، فظل كريستيان على ظهر السفينة «باونتي»، بينما استقل «بلاي» قارب القبطان. وقد وقع هذا العصيان التاريخي بالقرب من بركان «توفوا» الكبير بجزر «فريندلي» المعروفة الآن باسم جزر «تونجا»، والواقعة بجنوب غرب المحيط الهادي. كان «بلاي» و«كريستيان» خبيرين بمعالم هذه المنطقة من المحيط وكانا يعلمان أن طبوغرافية أعماقها المحيطة بهذه الجزر ليست عادية، إذ أنها تغص بالمواقع الضحلة الخطرة والممرات الضيقة التي تفصل بين الجزر. إلا أنها نظراً لأن الأساليب الصوتية لدراسة أعماق البحار لم تكنْ قد اخترعت بعد، فإن هذين الملاحين لم يكونا على علم بمدى غرابة هذه المنطقة، وبأنها سوف تؤدي يوماً ما إلى واحد من أهم المكتشفات في تاريخ دراسة البحار.**

فمن تحت صفحة البحار الساكنة شرق جزر «تونجا»، تنفرج في القاع هوة مروعة يناهز عمقها سبعة أميال. وبعد مائة عام من حادثة السفينة «باونتي» قامت سفينة بريطانية أخرى باختبار أعماق هذه المنطقة.

وفي أثناء عملية مسح قاع المحيط حول هذه الجزر، استرعى انتباه «بلهام أولد رتش» Pelham Aldrich قبطان السفينة الملكية «أيجيريا» أنه في محاولتين متتاليتين لم يلمسْ ثقل المطمار قاع المحيط إلا بعد أن تدلي خيط طوله ٢٤ ألف قدم. قد دفع اكتشاف «أولد رتش» بلاداً أخرى إلى إرسال فرق أبحاث لدراسة هوة «هونجا» الواقعة تحت البحر. وأخيراً تمكن الدارسون لهذه المنطقة من تتبع أخدود كبير يمتد حوالي ١٠٠٠ ميل من جزر«تونجا» غرباً إلى جزر «كيرماديك» وأكبر عمق أمكن العثور عليه حديثاً بالطرق الصوتية هو ٣٥٠٠٠ ألف قدم، وقد عثرت عليه باخرة الأبحاث «هورايزون» التابعة لمعهد «سكريبس» لعلوم البحار. وتتوغل هذه الهوة تحت سطح البحر إلى عمق يزيد عن ارتفاع جبال الهيمالايا بمقدار ٦٠٠٠ قدم.

وأخدود «تونجا – كيرماديك» ليس إلا حلقة واحدة من سلسلة مترامية الأطراف من الأخاديد العميقة الضيقة التي تمتد شبيهة بالخنادق المائية حول الحوض المركزي للمحيط الهادي. وهي جميعها تمتد موازية لأرخبيل (أي مجموعة الجزر) وسلاسل الجبال الواقعة على سواحل القارات. وتبلغ المسافة بين قمة جبال «الأنديز» الممتدة على سواحل أمريكا الجنوبية المواجه للشاطيء أكثر من ٤٠,٠٠٠ قدم. ولا يقل طول هذه الأخاديد أهمية عن عمقها، وقد يصل طول بعضها إلى ٢٠٠٠ ميل.

ولا تمت تلك الأخاديد بشبه إلى أي من المعالم التي نألفها على اليابسة، ولهذا فإنه من المتعذر علينا، نحن سكان اليابسة، أن نجلو

حقيقتها. وقد يتعذر على الإنسان أن يتخيل هذه الهوة السحيقة على أنها من العمق بحيث تستوعب أكثر من سبع أمثال أعمق وديان اليابسة مجتمعة بعضها فوق بعض، ومن الطول بحيث تصل بين مدينتي «نيويورك» و «كانساس». تلك هي مقاييس أخدود «تونجا – كيرماديك».

وحجم أخاديد المحيط الهادي وشكلها الغريب أمران يستثيران الدهشة. فبأي قوى عاتية نشأت مثل هذه التشكيلات في قاع البحر؟ ولم نشأت تلك الأخاديد بهذا الطول والعمق والضيق؟ وماذا آلت إليه المواد التي أزيحت من جراء تكوينها على هذا النمط؟ وهل هي قديمة العهد أم حديثة التكوين؟ وما أهمية الحقيقة التي تستند إلى وقوعها على امتداد «دائرة نار» المحيط الهادي وأعني بها منطقة البراكين النشطة والزلازل العنيفة التي تحيط المترامي الأطراف؟.

بالرغم من أن هذه الأخاديد لم تدرسْ بعد إلا دراسة تخطيطية، فإن ما حصلنا عليه من معلومات حتى الآن يمكن أن يهدينا إلى إجابات، مازالت عرضة للجدل والمناقشة، عن بعض هذه الأسئلة ويمكننا أن نتخذ من أخدود «تونجا – كيرماديك» مثالاً نموذجياً.

يمتد الأخدود من الشمال إلى الجنوب في خط مستقيم تقريبًا يقع شرق أرخبيل «تونجا وكيرماديك» وينعقف قليلاً عند طرفه الشمالي. ويبدأ الأخدود من هذا الطرف منخفضاً انخفاضاً يسيراً على شكل ملعقة، ويتخذ اتجاه الجنوب الشرقي بين «تونجا» و«ساموا»، ثم ينحني مع ازدياد

عمقه ويتجه جنوبًا نحوًا من ١٢٠٠ ميل، وأخيراً يصبح ضحلاً ثم يختفي عند نقطة تقع شمال نيويوزيلاند. والأخدود ضيق جدًا عند أعمق أجزائه الوسطى، ولا يتجاوز عرضه عند هذه الأجزاء خمسة أميال. وتتخذ الهوة شكل الرقم ٧، غير أن ذراع هذا الرقم القريب من الجزيرة أشد انحداراً من الذراع المواجه للبحر. ففي الجدار الغربي المواجه لليابسة يتروواح بين ١٦، ٣٠%. أي أنه يصل في بعض الأماكن إلى أكثر من ٢٤% وهو متوسط انحدار جوانب أخدود اليابسة العظيم عند «برايت انجل» ويتكون الأخدود في القطاع الطولي من منخفضات عميقة تفصل بينها تنوءات بارزة، ويبدو الأخدود على شكل حبات الخرز المنظومة في خيط.

وتبدو الجزر الواقعة عند الحافة الغربية للأخدود جزءاً من التركيب القشري – وتقع تلك الجزر في صفين على ربوة يبلغ طولها ١٠٠٠ ميل، وتقع عند قمة المنحدر الغربي للأخدود. وجرز مملكة البولينيز بتونجا مغطاة بطبقة من الحجر الجيري المترسب في المياه الضحلة خلال الحقبة الأخيرة من العصور الجيولوجية.

وترتكز تلك الجزر على أرفف مرجانية عريضة تقع تحت سطح الماء على عمق يتراوح بين ١٨٠، ٣٦٠ قدمًا، وترتفع على شكل سلسلة من المسطحات إلى بضع مئات الأقدام فوق سطح البحر. وغرب الجزر المكونة صخورها من الحجر الجيري يقع منخفض ضحل، تليه سلسلة من البراكين الواقعة تحت الماء والجزر البركانية المرتفعة. وتلك البراكين أقرب إلى النوع الثائر منها إلى براكين «هاواي» الهادئة. ويعزي إليها وجود كميات

ضخمة من الرماد الذي يغطي قاع البحر المحيط بها. وفي خلال المائة عام الأخيرة ثارت خمس من تلك البراكين، مما اضطر حكومة «تونجا» إلى إخلاء تلك الجزر من السكان تجنباً لأخطار ما قد يستجد من الانفجارات.

وتوجد تحت سطح الماء أيضاً براكين نشطة، من بينها «حافة فالكون» وهي ترتفع، أثناء ثورة بركانها إلى بضع مئات من الأقدام فوق سطح البحر. والواقع أنها تدعي عادة «جزيرة فالكون». وعقب كل ثورة تعمل الأمواج على تعرية الجزيرة من الحمم البركانية، فلا تمضي سنوات قليلة حتى يكون سطح الجزيرة قد هبط ثانية إلى مستوى سطح البحر.

وقاع الأخدود «تونجا –كيرماديك» صخري، ويبدو عارياً تقريباً من الرواسب. وفي أثناء قيام بعثة «كابريكون» التابعة لمعهد «سكريبس» بدراستها عام ١٩٥٢ – ١٩٥٣ طرأ خلل في الآلة الرافعة واضطرت البعثة سكريبس» بدراستها عام ١٩٥٢ – ١٩٥٣ طرأ خلل في الآلة الرافعة واضطرت البعثة إلى سحب جهاز أخذ العينات وما تصحبه من ثقل كبير من الرصاص فوق قاع البحر بضعة ساعات قبل أن تتمكن من انتشاله، وقد أخرج الجهاز وهو محطم تماماً قمن أثر احتكاكه بالصخور الموجودة بقاع المحيط. أما الماسك الصلب الثقيل الذي يسبق الجهاز فقد وجد منحنياً من شدة ما أصابه من صدمات. كما بدا الثقل الرصاصي كما لو كان قد طرق بمطرقة وأزميل. وقد وجدت شظايا صغيرة من الصخر البركاني دفينة في الرصاص.

وقد اكتشف عند المنحدر الشرقي للأخدود مخروط بركاني وحيد يرتفع في انحدار قليل إلى مسافة ٢٧٠٠٠ قدم، حتى تصل قمته إلى ما يقرب من ١٢٠٠ قدم تحت سطح البحر. وأسفل قمة هذا المخروط مباشرة توجد منطقة مستوية عريضة تميل نحو الغرب. وهذا المخروط الذي يعتبر واحداً من أكثر جبال الأرض ارتفاعاً قد يؤدي المزيد من دراسته إلى كشف ما نجهله من تاريخ الأخدود. ويكاد يكون من المؤكد أن المنطقة المستوية قد اقتطعتها الأمواج وقت أن كان الجزء الأعلى من القمة واقعاً فوق مستوى سطح البحر. وإذا استطعنا أن نحصل على حفريات المياه الضحلة عند قمة المخروط، لأمكننا تحديد الفترة التي غمرت فيها المياه قمة المخروط، وربما أمكننا أن نعرف متى بدأ ميل المنطقة المستوية ومن ثم ربما تيسر لنا أن نعرف ميل قاع الأخدود إلى أسفل.

ويعتبر أخدود «تونجا»، كما ذكرنا، حالة نموذجية لأخاديد المحيط الهادي. ومن بين عمالقة الأخاديد الأخرى أخاديد «الأليوشان» و«كوريل» و«اليابان» و«ماريانا» و«الفيليبين» و«جاوة»،وهي تقع على الجانبين الشمالي والغربي للمحيط، وأخدودا «الكابولكو» و«بيرو-شيلي» الواقعان بالجانب الشرقي للمحيط. ومما هو جدير بالملاحظة، وقد تكون له دلالة معينة، أن الأخاديد تكاد جميعاً تتساوى في الحد الأقصى الذي تصل إليه أعماقها. وأقصى سجل حتى الآن يبلغ ما بين ٣٥٢٩٠ قدماً، ٣٥٦٤٠ قدماً، وذلك عند الجنوب الشرقي من جزر ماريانا. وهذا العمق قد سجلته السفينة الملكية الحديثة «تشالنجر»، وهو نفس اسم السفينة الشهيرة التي تعتبر رحلتها حول العالم في عام ١٨٧٠ مولدًا لعلم

البحار الحديث. والواقع أن السفينة الأصلية «تشالنجر» هي التي اكتشفت منخفض «ماريانا، وقد عرفت لمدة سنوات طوال باسم «هوة تشالنجر».

وعلى وجه العموم يبدو أن المقطع المستعرض لجميع الأخاديد العميقة يتخذ شكل الرقم «٧»، رغم أن بعضها قليل الاستواء عند القاع، يتراوح عرض هذا الجزء المسطح ما بين ميلين وعشرة أميال في أخدودي اليابان والفيلبين ويبدو كذلك أن مقطع بعض الأخاديد الضحلة، والمنخفضات الشبيهة بالأخاديد، على شكل حرف U، وكذلك اتضح أن مساحات كبيرة من قاعها مستوية كما لوكانت الرواسب قد ملأت جزءاً منها. وإذا وجدت الرواسب بالأخاديد التي على شكل الرقم ٧ فإن سمك تلك الرواسب لا يمكن أن يعدو مئات قليلة من الأقدام.

إن عملية استكشاف هذه الأخاديد استكشافاً مباشراً أمر غاية في الصعوبة. فعمقها السحيق وشدة ضيقها يقيمان صعوبات لا يمكن تلافيها. لكي تدلي إلى قاع الأخاديد العميقة بأجهزة ثقيلة لتصيد العينات لابد أن تجهز السفينة بحبل دقيق مصنوع من أقوى أنواع الصلب. وكذلك بآلة رفع قوية مصممة بطريقة خاصة. وهذا النوع من الآلات الرافعة لا يوجد منه الآن غير ثلاث فقط وقد صنعت أحداها لحساب بعثة «الباتروس» السويدية عام ١٩٤٨ – ١٩٤٩، وقد استعملتها فيما بعد بعثة «جالاثيا» الدانيماركية عام ١٩٥٠ – ١٩٥٢ والآلة الرافعة الثانية

مودعة بسفينة الأبحاث «سبسر ف. بيرد» التابعة لمعهد سكريبس، وتوجد الرافعة الثالثة بسفينة الأبحاث السوفييتية «فيتياز».

وإطار الآلة الرافعة بالسفينة «بيرو» يستوعب ٤٠٠٠ قدماً من الأسلاك وعندما تتدلى هذه الأسلاك في أخدود «تونجا» وبطرفها ثقل العينات الكبير يبلغ الضغط الناجم عنها عند سطح السفينة ١٢ طناً.

وتستغرق عملية إدلاء الثقل لأخذ العينات ساعات عديدة. ومما يزيد الأمر تعقيداً عدم إمكان الاحتفاظ في معظم الأحيان بسفينة الأبحاث الصغيرة في بقعة ثابتة في وسط المحيط الهادي وووتحت وابل من تيارات عاتية لا يمكن التكهن بها، وكذلك تحت تأثير الرياح الجارفة. فالأسلاك دائماً عرضة لأن تنفصم وكذلك تتعرض الآلة الرافعة عند أي وقت للتلف بتأثير الضغط الكبير، وكلا الأمرين يعتبر خسارة فادحة تودي بهذا الجهد الثمين. وتشل حركة العمل وتبدد الآمال التي من أجلها بذلت الجهود لإيفاد سفينة علمية إلى الأماكن النائية من العالم.

وإذا كان قياس قاع الأخدود والحصول على عينات من ذلك القاع أمراً عسيراً، فإن عملية تثقيب القاع لمعرفة المواد الواقعة تحته أمر مستحيل تماماً بوسائلنا الحالية. ولذلك لا مفر من اعتمادنا في هذا الاستكشاف على وسائل غير مباشرة مثل دراسة أمواج الزلازل وقياس شواذ الجاذبية، وانتقال الحرارة خلال القشرة، والخواص المغنطيسية للصخور الدفينة.

ومنطقة الأخاديد هي الجزء من الأرض الذي يتمثل فيه نشاط الزلازل على أشده ففي تلك المنطقة كل الزلازل الكبرى تقريباً، وخاصة تلك التي عند الأعماق الكبيرة. وتقترن أعمق الزلازل بأعمق الأخاديد وأشدها انحداراً. ويوحي ذلك بأن القوى التي تتولد عنها هذه الأخاديد تعمل عند أعماق كبيرة تحت سطح الأرض.

وقد تكون الزلازل في الواقع هي السبب في وجود خط من البراكين الثائرة مواز للأخاديد وقد افترض بعض الباحثين أن الحرارة المتولدة عند بؤرة الزلازل تصهر الصخور المحيطة بهذه البؤرة، وأن المواد المنصهرة ترتفع ثم تلفظها البراكين في آخر الأمر.

وتمدنا الدراسات السيسمولوجية لانكسار الأمواج بدليل آخر يتعلق بطبيعة القشرة الواقعة تحت هذه الأخاديد. ويتضح من هذه الدراسات أن سمك القشرة الأرضية تحت الأخاديد (تونجا وغيرها) أقل من ثلث سمك القشرة الواقعة تحت القارات ومن ثم فإننا نستنبط حقيقة على جانب كبير من الأهمية، ألا وهي أن تركيب القشرة تحت الأخاديد هو من النوع المقترن بالمحيطات دون القارات.

وأهم الظواهر المقترنة بالأخاديد هو النقص في قيمة الجاذبية وتتوقف قوة الجاذبية على كتلة المادة الواقعة بين السطح وبين بعد عميق في باطن الأرض. وهذه القوة تتساوى بوجه عام عند جميع الأماكن الواقعة على خط واحد سواء كان المكان في حوض محيط أو على سطح قارة. وذلك

على الرغم من أن حجم الصخور الواقعة تحت مساحة قارية أكبر من حجمها تحت نفس المساحة من محيط ما وواضح أن القارات «تطفو» عالياً عن مستوى قاع البحر العميق، كما يطفو الطوف الخفيف في الوسط الذي يفوقه كثافة. وفي القارات نفسها يوجد عادة فرق طفيف في مقدار الجاذبية عند السطح الجبلي المرتفع ومقدارها عند سطح السهول المنخفضة. والفرق الشاسع هو أن سمك الطبقات المكونة من مواد خفيفة تحت الجبال أكبر منه تحت السهول. وتسمى حالة هذه القشرة بالتوازن الاستاتيكي.

وتختلف قيم الجاذبية المقاسة بالقرب من الأخاديد اختلافاً بيناً عن القيم المتوقعة. وتعتبر شواذ الجاذبية هذه من أكبر ما نصادفه من شواذ فوق سطح الأرض. فمن الواضح أنه ليس من المتوقع الحصول على توازن استاتيكي بالقرب من الأخاديد. فالقوى المكونة للأخاديد لابد وأن يكون تأثيرها مضاداً لقوة الجاذبية، فتعمل على جذب القشرة الواقعة تحت الأخاديد إلى أسفل.

والآن نتسائل عن كنه هذه القوى؟ وقد نحصل على إجابة ممكنة لهذا السؤال من دراساتنا لانتقال الحرارة في القشرة الأرضية فكما بين «أ. أ. بنفيلد» في الجزء من الكتاب عن «حرارة الأرض»، أن كميات ضئيلة من الحرارة تنتقل بصورة مستمرة من أعماق الأرض إلى سطح القشرة الخارجي. وتتولد معظم هذه الحرارة من تحلل العناصر المشعة الموجودة بالقشرة وبالطبقة الغلافية التي تحدها من أسفل. فبالقرب من سطح الأرض يكون

معظم انتقال الحرارة نحو الخارج بطريق التوصيل، أما عند الأماكن الأكبر عمقاً فقد تتحرك الصخور الساخنة إلى أعلى حركة بطيئة، حاملة معها طاقتهخا الحرارية نحو السطح. فإذا حدث في مناطق ما من الأرض أن تحركت الصخور الساخنة والواقعة عند الأعماق إلى أعلى فلابد وأن هناك مناطق أخرى تتحرك منها الصخور الباردة إلى أسفل. مثل هذه الحركة من شأنها أن تحد من انتقال الحرارة نحو الخارج. وتدل القياسات بالقرب من قاع أخدود «أكابولكو» على أن انتقال الحرارة هناك أقل من نصف المتوسط بالنسبة لسطح الأرض (ويبلغ المتوسط حوالي ٢٥٠ سعراً في السنة لكل بوصة مربعة من السطح). ومن ثم فمن المحتمل أن هناك صخوراً باردة نسبياً تتحرك إلى أسفل تحت الأخدود. مثل هذه الحركة المتجهة إلى أسفل قد تجر معها القشرة، الأمر الذي قد يفسر تكوين الأخدود. وإذا كانت هذه العملية جارية فلابد أن الطبقة الغلافية من الأرض أبرد تحت الأخاديد منها عند أي موقع آخر. وتلك حقيقة تؤيدها القياسات المغنطيسية، إلا أن عدد تلك القياسات لا يزال أقل مما يمكننا الاعتماد عليه.

ومن المتوقع من مجمل معلوماتنا أن نضع تاريخ حياة الأخدود في الصورة الآتية: تعمل القوى الصادرة من أعماق الأرض على تشكيل قاع البحر مكونة أخدوداً على شكل الرقم ٧. ويستقر العمق عند حوالي ٣٥٠٠٠ قدم تحت سطح البحر، غير أنه ربما يستمر سحب مواد القشرة، ومن بينها الطبقات الرسوبية، إلى أسفل داخل الأرض. والذي يحملنا على أن نفترض ذلك هو أن أعمق الأخاديد لا تحتوي في الظاهر

على رواسب رغم أن الأخاديد تعتبر مصيدة طبيعية لتلك الرواسب. هذا وتنشط البراكين والزلازل عادة خلال هذه الفترة من تاريخ الأخدود.

وفي أثناء الفترة الثانية من تاريخ تفتر القوى العاملة على جذب القشرة أو هصرها إلى أسفل تحت الأخدود ومن ثم يبدأ الأخدود في استقبال الرواسب، ولذلك يتخذ الأخدود شكل حرف U عند ما تغطى الرواسب التعاريج الطبوغرافية. وقد تتجمع الرواسب وتتراكم حتى تعلو قمتها في آخر الأمر إلى ما يفوق سطح البحر مكونة الجزر، وذلك عندما تصل المنطقة إلى توازنها الاستاتيكي. وتتكون الرواسب الموجودةفي المياه الضحلة كالحجر الجيري، مثل ذلك «تونجا» و «ماريانا».

وهناك عملية أخرى قد تلعب دوراً عنتدما تتراكم طبقة سميكة من الرواسب. فمثل تلك الطبقة قد تكون بمثابة غطاء وعازل حراري للأخدود. ذلك لأنها رديئة التوصيل الحراري. ويترتب على ذلك أن يوقف انتقال الحرارة من الداخل، فترتفع درجة الحرارة أسفلها مما يؤدي إلى انصهار جزء من الصخور العميقة، وحينئذ قد ترتفع المادة المنصهرة إلى أعلى، لتحول الصخور الثقيلة والجزء الأسفل من طبقة الرواسب إلى صخور خفيفة من النوع الجرانيتي. وعلى هذا فإن سُمك القشرة لابد أن يزيد عند منطقة الأخدود.

وقد اقترح بعض الجيوفيزيائيين أن مثل هذا التسلسل في الحوادث، قد تكرر مرة تلو أخرى خلال الماضي الجيولوجي، وهذا هو النمط الذي

نمت به القارات على حساب أحواض المحيطات. هنا يعن لنا أن نتسائل: في أي مكان من القارات توجد تلك الأخاديد التي امتلأت؟.

وطبيعي أن يتجه تفكير المرء إلى أول وهلة إلى تلك التكوينات المحدودة والتي تمد إلى مسافات طويلة والمسماة بالقباب المقعرة (Geosynclines) حيث تراكمت الرواسب ونشأت السلاسل الجبلية، وتحت عوامل الضغط تكونت الطيات. فهل كانت بعض هذه القباب المقعرة في باديء أمرها أخاديد كتلك التي نجدها بقاع المحيط؟ كان المعتقد عادة أن الأمر ليس كذلك، إذ أن معظم الرواسب في القباب المقعرة تبدو أنها استقرت في مياه ضحلة وليست في أخاديد عميقة. ومع كل فقد لا يكون هذا المظهر في بعض الأحيان سوى صورة مضللة. فعينات الرواسب التي جمعت من أعمق الأخاديد تشبه من أوجه عدة الرواسب التي تستقر في المياه الضحلة.

وحقيقي أن الصخور الرسوبية بالقباب المقعرة لاتحتوي على حفريات معروفة لحيوانات البحار العميقة، غير أن حداثة عمر الأخاديد لا يمكنها من أن تترك سجلاً واضحاً. وأعماق الأخدود حالكة مظلمة اللهم إلا من بعض الأضواء الخافتة التي تبعث بها بعض الكائنات الحية المضيئة، ولا قدرة للنبات على أن يعيش هناك. ولابد للحيوانات والبكتيريا هناك من أن تحصل على غذائها شتاتاً من البقايا النباتية والحيوانية التي تهبط ببطء من الطبقات العليا في البحر. والمياه بالأخاديد شديدة البرودة. وتبلغ حوالي ٣٦,٥ ° فهرنهيت، ومن المحتمل أنها كانت أدفأ من ذلك بحوالي

٢٠° في الماضي الجيولوجي. والضغط عند قاع الأخدود مرتفع جداً بطبيعة الحال، إذ يربو على ثمانية أطنان على كل بوصة مربعة.

ومنذ أعوام عديدة انتشلت بعثة «جالاتيا» الدانيماركية

وقد عثر بقاع بعض الأخاديد العميقة على مواد من المفروض عادة أنها لا تترسب إلا في المياه الضحلة. والتقطت بعثة «جالاتيا» من قاع أخدود الفلبين رملاً ناعماً رمادي اللون، وبعض الحصى وبقايا من نبات اليابسة. وفي حوض «بورتوريكو» عثر مرصد «لامونت» الجيولوجي بجامعة كولومبيا على هياكل الحيوانات ونباتات لا تعيش إلا في المياه الضحلة. وفي الجزء الشمالي المستوي القاع من أخدود «أكابولكو» احتوت إحدى العينات على طينأسود ناعم غني بالمخلفات العضوية وتفوح منه رائحة كبريتور الكربون الكريهة، كما عثر في عينات أخرى على طبقات من الرمل الرمادي والأخضر والبني والغرين كما وجد بين هذه الطبقات قطع خشبية متفحمة وطين ناعم أخضر اللون.

وعلى كل، فمن الواضح أن بعض القباب المقعرة، وخاصة تلك التي تقع على امتداد جبال «أبالاشبيان»، لا يمكن أن نعزوها إلى أخاديد كانت أصلاً واقعة في البحر العميق، إذ أنها تحتوي على رواسب من المستنقعات وسهول غمرها الفيضان برواسب بحرية، ومن ثم فغن تلك الرواسب لابد وأن تكون قد استقرت أصلاً في مياه ضحلة.

والسؤال الذي لا يزال يشغل بالنا هو: أين هي أخاديد الماضي؟ وهل نحن نجتاز الآن عصراً جيولوجيًا خاصًا، وهل الأخاديد الحالية التي تبدو لنا حديثة العهد لم يكنْ لها نظائر في معظم التاريخ الجيولوجي؟ إن مثل هذا التصور

لا يلائم كثيراً من الجيولوجيين إذ لا يستقيم مع القاعدة القائلة بأن الحاضر هو مفتاحنا إلى الماضي ولابد أن نواصل بحثنا عن أخاديد قديمة بقاع البحر العميق، وبالمناطق المتطرفة للمياه الضحلة، وبالقارات نفسها.

القسم الرابع

الغلاف المائي

HYDROSPHERE

الجزء الأول: جبال الجليد (GLACIERS)

ويليام أ. فيلد

المؤلف هو رئيس قسم الاستكشاف والأبحاث بالجمعية الجغرافية الأمريكية، وقد بدأ اهتمامه بدراسة الجبال الجليدية بكلية هارفارد حيث تفوق في علم الجيولوجيا. وفي ذلك الوقت عرف أن الجبال بمنطقة الأسكا تتعرض لنفير سريع، فقرر «فيلد» أن يعكف على دراستها وتعقب تطورها مع الزمن. وبمجرد أن تخرج في عام **١٩٢٦** قام بأولى رحلاته المتعددة إلى تلك المنطقة. وفي عام **١٩٤٠** انضم إلى الجمعية الجغرافية الأمريكية، وعهد إليه بوضع برنامج شامل لدراسة طويلة المدى لجبال الجليد. وفي اثناء الحرب العالمية الثانية أعد «فيلد» أولى أفلامه التدريبية لسلاح الإشارة، ثم قضى عامين بالهند وبورما بعمل شركة تصوير. وكان «فيلد» مسئولاً عن وضع برنامج دراسة الجبال الجليدية الذي ساهمت به الولايات المتحدة الأمريكية في السنة الجيوفيزيائية الدولية.

الجزء الثاني: دورات المحيطات

والتر ه. منك

ولد «والتر هـ. منك» بالنمسا، وهي الدولة التي تفخر بأن ينتسب إليها كثيرون من علماء علوم البحار، رغم افتقارها إلى البحار نفسها. ويشغل «منك» منصب استاذ الفيزياء الأرضية بمعهد «سكريبس» لعلوم البحار بمدينة «لاجولا» بكاليفورنيا، وقد حصل على درجة الماجستير في الفيزياء الأرضية من معهد كاليفورنيا للعلوم التطبيقية، وفي عام ١٩٤٧ حصل على درجة الدكتوراه في علوم البحار من معهد «سكريبس».

جبال الجليد

ويليام أ. فيلد

الماء هو إحدى المواد التي توجد في الطبيعة في حالاتها الفيزيائية الثلاثة – سائلة وصلبة وغازية. ويحتوي كوكبنا على ماء يبلغ في جملته حوالي ٣٥٠ مليون ميل مكعب، ويوجد معظمه بالطبع في المحيطات، والماء في حالته الصلبة، سواء على شكل جليد أو ثلج لا يتجاوز ١٪ من مجموع مياه الأرض، وهو على شكل بخار في الجو أقل كثيراً من هذه النسبة، ومع كل، فهذه النسب تؤلف توازنًا دقيقًا بالغ الأهمية بالنسبة للحياة على سطح الأرض. فأي تغير كبير في نسب الماء والجليد وبخار الماء بالجو تترتب عليه نكبات تلحق بالإنسان واقتصادياته. وعلى سبيل المثال، نجد أن الجليد المتراكم فوق اليابسة يتحكم في مستوى سطح الماء بالبحار ويؤثر على المناخ ويسيطر على مصادر الماء بالقارات.

وتغطي جبال الجليد الآن حوالي ١٠٪ (أي حوالي ٦ مليون ميل مربع) من مساحة اليابسة. وتقديرنا لمجموع المياه الموجودة بها ليس إلا حدساً تقريبياً، إذ ليس لدينا غير معلومات غامضة عن سمك طبقة الجليد بالمنطقة المتجمدة الجنوبية ويؤلف هذا الغطاء الجليدي حوالي ٨٦٪ من مساحة الجبال الجليدية على سطح الأرض. ويؤلف الغطاء بمنطقة جرينلاند حوالي ١٠٪ من هذه المساحة الكلية. وليست المساحة المتبقية، أي البالغة ٤٪ بالضئيلة الشأن إذا قيست بالآثار التي يمكن أن تترتب على

وجودها، فهي تشمل عشرات الآلاف من الأميال المربعة من الكتل الجليدية الكائنة فوق جبال المناطق المعتدلة المناخ، وهذه تتحكم تحكماً وثيقاً في المناخ وفي مصادر بالنسبة لمعظم سكان العالم من الجنس البشري. ويعتبر التغير في الحجم هذه الكتل الجليدية مقياساً دقيقًا لتغير المناخ.

يقدر الحجم الكلي للمياه التي تحتويها الجبال والكتل الجليدية في أنحاء العالم بما يتراوح بين حوالي ٢,٤ مليون ميل مكعب وما يربو على ٦ مليون ميل مكعب. ، وإذا قدر لكل هذا الجليد أن يذوب لارتفع مستوى سطح الماء في محيطات العالم بما يقرب من ٦٥ إلى ٢٠٠ قدم!.

توجد جبال الجليد في المناطق التي يتزايد هطول الثلج فيها سنة بعد أخرى بحيث تفوق الزيادة السنوية معدل ما ينصهر من الجليد سنوياً. ويترتب على هذا انه لا يتحتم أن يكثر وجود الكتل الجليدية حيث يكون المناخ أبرد ما يمكن.

ففي ألاسكا يزداد تراكم جبال الجليد على الشاطيء الجنوبي وهو أدفأ جزء في الإقليم. ولكن تساقط الثلج فيه شتاء أكثر من تساقطه في الأجزاء الأخرى. وهناك أجزاء عارية من الجبال الجليدية في شمال «جرينلاند» لأن تساقط الثلج فيها غير كاف.

وعندما يتراكم الثلج المتساقط يكون من أثر ضغط طبقاته العليا أن يتماسك متحولاً إلى كتلة جليدية، ويبدأ الجليد، متأثر بثقله، في الانسياب إلى ارتفاعات أقل. ويختلف معدل انسياب حركة الجبال الجليدية اختلافًا

كبيرًا، إذ يتحرك بعضها في بطء شديد، بينما يتحرك بعضها الآخر بسرعة تصل إلى ٥٠ قدمًا في اليوم. وعند الارتفاعات المنخفضة تصهر الجبال الجليدية وتدفع بالكتل الثلجية إلى عرض البحر. وتقدم جبل الجليد أو انحساره أمر لا يتطلب أكثر من تغير طفيف يطرأ على الارتباط بين كمية الثلج المتساقطة سنوياً، ودرجة حرارة فصل الذوبان، وغير ذلك من الأحوال الجوية.

	ميل مكعب
حجم الماء بالمحيطات (تقدير قريب من الدقة)	٣٢٩,٠٠٠,٠٠٠
حجم الماء بالجو (تقدير مقرب)	٢,٦٠٠
حجم الماء بجبال الجليد (تقدير المتوسط)	٣,٢٥٠,٠٠٠
حجم الماء بالبحيرات والأنهار (تقدير مقرب)	٥٥,٠٠٠
حجم المياه الجوفية عند مستوى أعلى من ١٢,٥٠٠ قدم (تقدير مقرب جدًا)	١,٠٨٠,٠٠٠
حجم المياه الجوفية عند مستوى أقل من ١٢٥٠٠ قدم (تقدير مقرب جدًا)	١٩,٧٠٠,٠٠٠

جدول يبين أحجام المياه موزعة بين سطح الأرض والجو وبين سائلة وصلبة. ويبلغ حجم الماء بجبال الجليد حوالي ١% من المجموع الكلي.

ومن المحتمل أن الأرض في معظم فترات تاريخها كانت خالية من الجبال الجليدية. فنحن نجتاز عصراً استثنائياً، لا هو جليدي ولا هو غير جليدي. ففي خلال المليون عام الأخيرة مرت الأرض بأربعة عصور جليدية

عظمى على الأقل، وكان الجليد في ذروة هذه العصور يغطي حوال ٣٢٪ من مساحة اليابسة. وكانت العصور الجليدية يفصل بين كل منها فترة دفء طويلة تكاد تختفي جبال الجليد أثناءها. ويبدو أننا نجتاز الآن طوراً انتقالياً، طوراً يقع في فترة ما بين عصر جليدي وعصر يفصل بين عصرين جليدين. فعدد جبال الجليد الآخذة في النمو الآن محدود، في حين أن معظم جبال الجليد في طور الانكماش، وبعضها في طريقه إلى زوال.

	ميل مربع
شمال أمريكا	٢٩,٧٠٠
جزر المتجمد الشمالي الكندي	٥٩,٢٠٠
جرينلاند	٦٩٥,٠٠٠
جنوب أمريكا	٩,٧٠٠
أوروبا	٤,١٠٠
جزر شمال الأطلنطي المتجمد الشمالي الأوروبي	٤٨,١٠٠
آسيا	٤٨,٧٠٠
أفريقيا	١٢
جزر المحيط الهادي	٤٠٠
جزر قريبة من المتجمد الجنوبي	١,٢٠٠
المتجمد الجنوبي	٤,٨٨٤,٢٠٠
المجموع العالمي	٥,٧٨٠,٣١٢

بين الجدول توزيع المساحات المغطاة بالجليد في اتجاه الأرض «والسمك الكبير لطبقة الجليد في منطقة التجمد الجنوبي يزيد من النسبة

الضخمة للجليد الموجود بتلك المنطقة «مقدرة بالميل المكعب» عن نسبته المساحة الكبيرة.

ومن المحتمل أن سطح البحر أثناء العصر الجليدي الأخير كان دون منسوبه الحالي بحوالي ٢٥٠ قدمًا، وكانت درجة الحرارة في العالم تقل في المتوسط بمقدار يتراوح بين ٧ درجات، ١٤ درجة. وكانت هناك خمس ساحات من سطح القارات يغطيها الجليد، تربو مساحة كل منها على مليون ميل مربع، وقد اختفت ثلاث من هذه الساحات، بأمريكا الشمالية وأوروبا وسيبيريا، وبقيت اثنتان منها بجرينلاند والمنطقة المتجمدة الجنوبية أما الجبال الجليدية فقد تقلصت جميعها.

بدأ ظهور الحضارة في غرب آسيا وشمال أفريقيا في نفس الوقت الذي بدأ فيه اختفاء الساحة الجليدية بأوروبا وأميكا الشمالية. وحوالي عام ٣٠٠٠ قبل الميلاد كان المناخ في معظم أنحاء العالم، إن لم يكنْ في العالم أجمع، أكثر جفافاً وأدفأ بمقدار درجتين أو ثلاث درجات عما هو عليه الآن. وكان مستوى سطح البحر، فيما يبدو، أعلى بمقدار يتراوح بين خمسة وستة أقدام. وكانت المنطقة الجليدية بالألب أعلى بمقدار ١٠٠٠ قدم على الأقل ومن المحتمل أن الجليد في المحيط المتجمد الشمالي كان ينصهر تماماً في صيف كل عام. أما بعض أجزاء المناطق المعتدلة، حيث تمدها الآن الجبال الجليدية الصغيرة بمصادر المياه الصيفية، فلابد أنها كانت جرداء.

وحوالي عام ١٠٠٠ قبل الميلاد بدأت الظروف تتغير تغيراً كبيراً فقد جنح المناخ إلى البرودة وازداد قيام العواصف في كثير من أنحاء العالم، وحوالي عام ٥٠٠ ق.م بدأت تنمو الجبال الجليدية مرة أخرى، ثم جاءت فترة تقهقرت فيها ثانية، وذلك خلال الألف عام الأولى بعد الميلاد. ولكنها عاودت نموها وبلغت ذروتها مرة أخرى في الفترة ما بين القرن السابع عشر والقرن التاسع عشر. وقد سجل بعض المراقبين بعث الجبال الجليدية هذا تسجيلاً مباشراً في الألب واسكندينافيا وأيسلاند. وقد بدأت الجبال الجليدية في التقلص مرة أخرى خلال النصف الأخير من القرن التاسع عشر. وقد ترتب على هذا أن مستوى سطح البحر أخذ في الارتفاع بمعدل ٢,٥ بوصة في كل قرن. ومع كل، فإن بعضها قد نما، خلافاً للقاعدة العامة. ففي بعض أجزاء غرب الولايات المتحدة الأمريكية نجد بعض جبال الجليد آخذاً في النمو، الأمر الذي ينبىء عن تغير في المناخ.

بدأت دراسة جبال الجليد دراسة جدية منذ نيف ومائة عام ١٩١٩ بدأ هانز و. ض. آلمان (Hans W. Son Ahlmann) بجامعة استوكهولم (الآن سيفر السويد إلى النرويج) عهدًا جديدًا في جغرافية جبال الجليد فقد أخذ يعالج بنظرة جديدة وبتفصيل أشمل موضوع جبال الجليد في اسكنديناڤية وأيسلاند وسبتزبرجن وشمال شرقي جرينلاند. وقد أدت دراساته إلى استنباط طريقة جديدة لقياس نموها أو تضاؤلها. ومراقبة جبال الجليد أمر يجري الآن بأسلوب منظم في أنحاء متعددة من العالم. وفي خلال الأعوام العشرة الأخيرة أجريت دراسات هامة في جرينلاند، وخاصة تلك

التي قامت بها بعثة «بول فيكتور» (Paul Victor) الفرنسية القطبية، وقدرت فيها حجم طبقة الجليد بجرينلاند، ودرست كميات الجليد في مساحة واسعة منها.

أما طبقة الجليد في المنطقة الجنوبية، والتي لا نعلم عنها إلا القليل، فتبلغ في الحجم قدر الولايات المتحدة الأمريكية وأقاليمها مرة وثلث مرة، وهي تغطي عملياً كل مساحة قارة المتجمد الجنوبي. وهناك مليونان من الأميال المربعة لم يسبقْ رؤيتها حتى من الجو، وذلك إلى وقت الكشف الحالي الذي يجري بمناسبة السنة الجيوفيزيائية الدولية. والمعروف أن قمة الجليد ترتفع إلى ١٣,٠٠٠ قدم، غير أن سمك الطبقة الجليدية لم يتمْ قياسه إلا في أماكن قليلة. ومنطقة المتجمد الجنوبي الآن موضع دراسة متشعبة يقوم بها المتخصصون في الجبال الجليدية وغيرهم من العلماء. وسوف تقوم باستكشافها فرق أبحاث لمدة عامين، يعملون إما في قواعد متعددة، أو مستخدمين عربات الجليد، أو مسجلين مشاهداتهم من الجو. وسوف يجمع أكبر قسط ممكن من المعلومات عن سمك طبقة الجليد وما يطرأ عليها من تغيرات، وكذلك عن الحالة الجوية، والتركيب العضوي داخل هذه القارة الجليدية. وسوف تقام إحدى المحطات الأمريكية بالقرب من القطب الجنوبي، وعلى ارتفاع ٩٥٠٠٠ قدم، كما تعد دول أخرى محطات داخل القارة. وسوف تكون هذة هي المرة الأولى التي يقضي فيها إنسان فصل الشتاء بداخل هذه القارة. ولا يعلم أحد إلى أي درجة تصل البرودة شتاء قرب القطب الجنوبي، غير أنه من المتوقع أن تصل درجة الحرارة إلى ١٠٠º فهرنهيت تحت الصفر أو أبرد من ذلك.

أما في النصف الشمالي من الكرة الأرضية فسيوجه برنامج الولايات المتحدة الأمريكية بصفة خاصة إلى دراسة جبال الجليد: من حيث نموها وتناقصها وحجمها، وارتباط كل ذلك بالتغيرات التي تطرأ على الأحوال الجوية. وستتناول الدراسة شمال غربي المحيط الهادي، وألاسكا، وجليد بحر المتجمد الشمالي، والغلاف الجليدي بجرينلاند. وسوف تكون هذه الدراسة بمثابة امتداد وتوسع للدراسات التي أجريت على فترات متقطعة منذ عام ١٨٨٠، والدراسات المنظمة التي أجريت خلال ربع القرن الأخير.

الهدف من كل هذه المشاهدات هو تقدير الحالة الراهنة لجبال الجليد حتى يمكن مقارنة مسلكها والتوازن المائي في الأنحاء المختلفة من العالم. وتلك المشاهدات لابد أن تمدنا بشتى المعلومات، ليس فقط عن التاريخ الماضي للأرض، بل أيضاً مستقبل التطورات الممكنة في كمية المياه وفي المناخ.

دورات المحيطات

والتر ه. منك

يعلم الجميع الفارق بين المناخ وحالة الجو بين يوم وآخر. وكثيرون لا يعلمون أن مثل هذا التمييز ينطبق أيضًا على حالة تيارات المحيطات. وإلى عهد قريب كانت معلوماتنا مقصورة فقط على متوسط المعالم العريضة لتحركات المحيط – أي التيارات «المناخية». غير أن الدراسات الحديثة قد كشفت عن وجود تحركات دقيقة مستقلة عن هذا المناخ، لا تلبث أن تغير من اتجاهها من يوم إلى آخر بأسلوب زئبقي غاية في الغرابة. فإذا استخدمنا عشر سفن في مواضع استراتيجية في تيار الخليج (Gulf Stream) لقياس التيارات وعمل «خريطة طقس» للتيار في يوم الخميس المقبل، لاختلفت الخريطة عن تلك التي نحصل عليها بالنسبة ليوم الجمعة التالي. ومنذ زمن غير بعيد كنا نراقب سفينة شحن متجهة إلى أوروبا متخذة في عناية طريقاً مرسوماً كان حرياً حسب الخريطة المناخية القديمة أن يعجل بوصولها إلى غايتها نتيجة لانتفاعها بتيار الخليج. ولكن الواقع أن السفينةكانت تشق طريقها في بطء إذ كان يعترضها تيار مضاد سرعته عقدتان، بينما كان تيار الخليج في ذلك الوقت يبعد بمسافة مائة ميل عن طريقه المعتاد.

والنزوات التي كانت تنتاب تيارات المحيط لم تكن من الناحية العملية معروفة إلى أن قامت الحرب العالمية الثانية، حينما استحدثت أساليب

جديدة، وبنيت الخرائط المفصلة أن التيارات بالمحيط الأطلنطي ليست مستقرة، أو أنها ليست مما يمكن التكهن بها كما توحي به الخرائط المناخية السابقة. وكان من أثر ذلك أن أصبح رجال علوم البحار مهتمين الآن بنوعين من الخرائط: الخرائط المناخية التي تبين متوسط التيارات في مساحة كبيرة لمدة عام، والحر. خرائط الإجمالية التي تشبه التقرير اليومي أو الأسبوعي عن الجو، والتي تبين كيف تتغير التيارات من أسبوع لآخر. وتبدو التيارات في أحد نوعي الخرائط مختلفة تمام الاختلاف عنها في النوع الثاني. ففي الخرائط الإجمالية تبدو التيارات ضيقة ومتعرجة وسريعة، بينما تبدو في الخرائط المناخية عريضة وقليلة التعرج وبطيئة. ولكل من الخريطتين فوائده. فإذا شئت أن تدرس ظاهرة طويلة المدى مثل نزوح الرواسب بعيدًا عن القارات بتأثير تيارات المحيط، فعليك بالتزام الخريطة المناخية، ومن م الأخرى ستكون الخريطة الإجمالية أكثر نفعاً لك إذا كنت تقود سفينة أو غواصة.

أعد علماء علوم البحار خرائط للتيارات التي تجتاح جميع محيطات العالم بصفة عامة، مستخدمين في ذلك طريقة تشبه تلك التي تحدد بها التيارات الهوائية بالجو. بمعنى أن تيارات المحيط تستنبط من مجالات الضغط بالبحار. وتلك يمكن معرفتها بقياس درجة ملوحة الماء ودرجة حراراته. والشكل (١٠) عبارة عن خريطة تلخص لنا ما نعلمه عن التيارات المناخية التي تجتاح سطح المحيطات (طبقة عمقها ١٠٠٠ قدم من السطح).

هل يرتبط هذا النمط المعقد للتيارات بنظام ما؟ وهل هناك قاعدة ما يخضع لها هذا النمط؟ أظن أن تلك القاعدة موجودة، والخريطة الموضحة في شكل (١١) هي محاولة لتحليل العناصر الرئيسية للصورة. ولنفترض أننا مثلنا بيانيًا التيارات التي يجب أن تظهر في محيط مثالي مستطيل الشكل تؤثر عليه الرياح المعروفة التي تهب على العالم عند خطوط العرض المختلفة. (ولتبسيط الأمور سوف نأخذ في اعتبارنا فقط المركبات الشرقية – الغربية لنظام الرياح متجاهلين التفاصيل من أمثال الرياح التي تهب حول مرتفع برمودا) عندئذ تنقسم الدورات في مثل هذا المحيط إلى دورات (حلقات) تناظر أحزمة الرياح – حلقة في عكس اتجاه حركة عقرب الساعة بالمناطق الدوقطبية (الواقعة قبل القطبين) وتيار في اتجاه حركة عقرب الساعة بالحزام الدوستوائي (دون خط الاستواء) الشمالي، وحلقة ضيقة على كل من جانبي خط الاستواء، وحلقة في اتجاه مضاد لحركة عقرب الساعة في المنطقة الدوستوائية الجنوبية ويوجد بكل حلقة تيار قوي متواصل على الجانب الغربي (ناشيء كما سوف نرى عن دوران الأرض) يعدله تيار آخر مضاد بالجزء الأوسط والشرقي.

يمكننا بشيء من التصور أن نتعرف على هذا النمط في أحواض المحيطات الثلاثة الكبرى بالأرض. فالتيار الغربي القوي يتمثل في تيار الخليج بالمحيط الأطلنطي الشمالي، وتيار «الكوروشيو» بشمال المحيط الهادي، وتيار «البرازيل» بالمحيط الأطلنطي الجنوبي، وتيار «أجولهاش» بالمحيط الهندي، وربما أيضًا تيار «شرق آسيا» بجنوب المحيط الهادي. والتيار الذي تدفعه الرياح الغربية القوية خلال الفترة «الأربعينية الهادرة» بنصف

الكرة الجنوبي لا يتدفق في حلقة، ولكنه يدور حول الكرة جميعها إذ لا تعترض القارات طريقه، وذلك هو تيار المتجمد الجنوبي العاتي الذي يدور حول القطب.

التيارات المناخية بالمحيطات موضحة على مسقط يمثل أحواض المحيطات مع أقل اندماج فيما بينها. والنمط «مناخي»، بمعنى أنه يمثل المتوسط الطويل المدى ويتجاوز عن التغيرات التي تحدث من يوم لآخر.

وحلقات تيار المحيط في صورتنا هذه لا يقتصر تطابقها مع نظام الرياح فحسب، ولكنها أيضاً تناظر الخواص الكيميائية والبيولوجية لمناطق المحيط. وعلى سبيل المثال، تحيط كل حلقة من حلقات المنطقة الدوستوائية ببحر دافىء نسبياً، مالح، فقير في المواد الفوسفاتية، نشاطه البيولوجي ضئيل، ولونه أزرق (والأزرق هو اللون الصحراوي للبحار). وعند أطراف الحلقة تتغير هذه الظروف تغيراً حاداً، ويسيطر على البيئة الواقعة عند مركز كل حلقة بالقرب من الشاطيء الغربي استقرار غير عادي. خير مثل نعرفه لهذه المناطق هو بحر سارجاسو بالمحيط الأطلنطي، واسمه مشتق من حشائش السرجوم الطفيلية التي يكثر تواجدها به. أما المناطق الستة الأخرى بالعالم — مراكز الحلقات الدوستوائية بالمحيطات — فمن الممكن أن نجدها عامرة بنفس النوع من الحياة البحرية، مع التجاوز عن فوارق بيئية محدودة، ولكن هذا أمر لا يزال يحتاج إلى استكشاف.

التفاصيل الدقيقة للميكانيكية التي تولد بها الرياح دورات المحيط أمر معقد وغير واضح. وأول الأمور المعقدة هو في حد ذاته فعل الرياح بالماء. فالرياح يمكنها ببساطة أن تحرك الماء بقوة الاحتكاك لدى انزلاقها على صفحته، حتى عندما تكون هذه الصفحة هادئة. ولابد أيضاً أنها تزيد من سرعة حركة الماء عندما ترفع الرذاذ ثم تهبط به ثانية، وخاصة أثناء الأنواء، عندما تتزايد كميات الماء المرتفعة بحيث يختفي «الحد الفاصل» بين صفحة الماء والهواء. ومن الوسائل الهامة التي تدفع بها الرياح مياه المحيط هو ضغطها على الأمواج عندما يكون البحر هائجاً – تماماً كما تنحني ورقات الحشائش لدى هبوب الرياح على حقل، إذ يكون الضغط على الجانب الذي تهب منه الريح أعلى منه على الجانب الآخر. ومن ثم نتبين أن العامل الأساسي في تجاوب الماء مع الرياح ليس هو الأمواج الضخمة التي تهز السفن وتصيب الناس بدوار البحر، ولكنه المويجات الصغيرة. وإذا قدر لنا أن نغطي شمال الأطلنطي بطبقة من الزيت لنجعل من هذه المويجات سطحًا مستويًا، لأصبح تيار الخليج أضعف بكثير مما هو عليه الآن. وتبلغ أهمية هذه المويجات الصغيرة حداً مدهشاً. وإني لأتساءل هل يعني أي ملاح أمين بأن يعترف بأن المويجات الصغيرة التي لم يعرفها إلا القليل من اهتمامه ربما كانت بعضاً من أسباب انحرافه عن طريق ملاحته؟.

كيف يتسنى للرياح الدافعة أن تولد الحلقات الكبرى بالتيارات، تلك الحلقات التي نشهدها بالمحيطات؟ هناك نظرية نضجت خلال الأعوام العشر الأخيرة. ولنبدأ من موضع لا توجد به حواجز يابسة تعترض طريق الماء الذي تدفعه الرياح. في هذه الحالة سوف تجري التيارات في دائرة كبيرة

حول الأرض كما هو الحال في التيارات التي تجري حول قارة المتجمد الجنوبي. وتتعقد الأمور عندما ندخل في اعتبارنا كتل اليابسة ولنفترض أننا نقيم حواجز لنحصل على بحر مقفل فإذا هبت الريح من الغرب فقط وكانت قوتها متساوية لدى كل خطوط العرض التي تمر بهذا البحر، ففي هذه الحالة لا يمكن أن تتولد تيارات دوارة؛ وهذا أمر تام الشبه بعجلة الطاحونة الهوائية التي تتعرض ألواحها المتقابلة لقوى متساوية تعمل في نفس الاتجاه، إنها لا تتحرك في هذه الحالة. إن الرياح سوف تكون سببًا في تراكم المياه في بساطة في الجانب الشرقي من البحر. أما إذا كان الريح عند خط عرض معين أقوى منه عند خط عرض آخر فإن الريح القوي سوف يتغلب على الريح الضعيف فتبدأ المياه في الدوران. وبالطبع يصبح دوران المياه أقوى إذا كان اتجاه الريح عند خط عرض ما عكس اتجاهه عند خط عرض آخر. وإلى هذا الأثر يجب أن نضم الآن الأثر الناجم عن دوران الأرض. وقد أوضح هنري ستوميل (Henry Stommel) بمعهد «رودزهول» لعلوم البحار أن دوران الأرض من الغرب إلى الشرق يولد عزماً من القوى التي تؤثر على تيارات المحيط وأن مركز هذا العزم يزاح نحو الغرب، فتشتد التيارات في الجانب الغربي.

وعلى وجه العموم نجد أن التيارات الكبيرة التي تدفعها الرياح بمحيطات العالم تلائم هذا النموذج وتنسق مع النظرية المشتقة منه. وتقع حدود التيارات العظمى حيث يجب أن تكون بالنسبة لنظام الرياح، كما تظهر كذلك التيارات الغربية القوية حيث يجب أن تكون، وفضلاً عن هذا فقد اكتسبت النظرية بعض التأييد من التجارب التي أجراها وليام فون

أركس (William Von Arx) من «وودزهول» على نموذج معملي يمثل تيارات المحيط. والنموذج عبارة عن حوض يشبه عجلة الروليت ويدور حول محوره، وهو أساساً على شكل نصف كرة مقلوبة. وتمثل المحيطات فيه بغشاء رقيق من الماء في حالة اتزان وهو عالق بسطح نصف الكرة التي تداوم دورانها، بينما تهب الرياح فوق الغشاء المائي من فتحات ضيقة لآلة تنظيف كهربائية. ويعبر نموذج «فون أركس» عن مسقط النصف الشمالي للكرة الأرضية على هذا الحوض بحيث يقع القطب الشمالي عند النقطة المنخفضة بمركز الحوض. وتوضع في هذا المركز بلورات «برمنجنات البوتاسيوم»، بحيث إذا أضيف بعض المداد إلى الماء يتفاعل مع البرمجيات فتبين الألوان المختلفة أنماط تدفق المياه «ويبرز نموذج» «فون أركس» في دقة الحلقات الدورانية لشمال الأطلنطي وجنوب المحيط الهادي، بما في ذلك التيارات الغربية الشديدة. ومما يزيد في أهمية النموذج أننا نستطيع تغيير الطبوغرافية والرياح بحيث توضح لنا التيارات الممكن وجودها في الماضي عندما كانت الظروف مختلفة، وعلى سبيل المثال يمكننا أن ندرس كيف كان مجرى تيار الخليج في الفترة التي كانت فيها أمريكا الشمالية منفصلة عن أمريكا الجنوبية عند الموضع المعروف الآن بمضيق بنما.

لا يصح أن نفترض أن هذه المشاهدات والتجارب تنطوي على التأييد الكامل للنظرية المتعلقة بكيفية تولد دورات المحيط، إذ تجد تناقضاً في بعض الحالات، وخاصة بعض الدورات في محيطات نصف الكرة الجنوبي التي تستقيم والنمط الذي تصوره تلك النظرية.

هذا هو موقفنا إذن من الدورات المناخية. بدأ عصر قياس التيارات الإجمالية، أو عناصر الطقس البحري يومًا بيوم، منذ عهد قريب عندما اخترعت الأساليب والأجهزة الحديثة وأهمها: (١) الطريقة اللاسلكية لتحديد الأماكن، والمعروفة باسم «لوران»، (٢) جهاز القياس السريع لدرجات الحرارة عند الأعماق المختلفة والمسمى «بالمسجل الحراري المائي»، (٣) جهاز يسمى بالرسم الكهرومغنطيسي الأرضي»، وهو الذي يعين حركة مياه المحيط عن طريق قياس الجهد الكهربائي المتولد في الجهاز نتيجة لحركته في المجال المغنطيسي الأرضي.

وقد اكتشف «كولومبوي أ. دونيل إيزيلين» (Columbus O'Donnel Iselin) ومعاونوه بمعهد «وودزهول» لدى معاودتهم لدراسة تيار الخليج أن هذا التيار أضيق وأسرع كثيراً مما كان معتقداً. وعندما تحسنت أجهزتهم ووسائلهم أصبح التيار أشد ضيقاً وأكثر سرعة. كما إتضح لهم أيضاً أن موضع التيار واتجاهه يتغيران من رحلة بحرية إلى الرحلة التي تليها. ففي عام ١٩٥٠ نظم مكتب علوم البحار ببحرية الولايات المتحدة الأمريكية بعثة من خمس سفن أطلق عليها اسم «عملية كابوت» لدراسة تيار الخليج عن كثب. واستطاعت البعثة أن تكشف ظاهرة غاية في الأهمية: فتيار الخليج قد ضل طؤيقه المعتاد ليرسم أنشوطة طولها ٢٥٠ ميلاً! وبعد يومين يبدو شكل الأنشوطة وقد اتخذ صورة دوامة مستقلة ثم أخذت هذه الدوامة تضمحل تدريجياً.

وقد قدرت كمية الماء التي تنقلها هذه الدوامة المفردة من شمال الأطلنطي وتدفع بها إلى دجنوب المنطقة الدوستوائية بحوالي ١٠ مليون طن. وواضح أن نقل مثل هذه الكمية الضخمة من المياه بما تحويه من الكائنات الحية لابد أن يكون عظيم الأهمية بالنسبة لأحياء البحر. ومن الممكن أن تندفع دوامات مماثلة من الجنوب نحو الشمال لتحمل بمياه المنطقة الدوستوائية إلى الجزء من المحيط الأبرد منها.

وهناك خصائص أخرى لتيار الخليج لم يكن يخطر وجودها ببال أحد إلى أن اكتشفها «فيردريك فيلجستر» (Frederick Füglister) بمعهد «وودزهول»، وهو فنان يشتغل بعلوم البحار منذ الحرب العالمية الأخيرة. فعندما رسم فوجلستر التيارات مستخدماً التدرجات الحرارية التي قيست بواسطة راسم للحرارة المائية، حصل على نمط يستفاد منه أن تيار الخليج يتكون من عدد من الشرائط أو الغدائر الطويلة الضيقة المتفرقة. وأن هذه الغدائر ليست متصلة على مدى آلاف الأميال، بل القاعدة أن يتلاشى الغدير في مكان ما كي يبدأ غدير آخر في مكان آخر. أو بعبارة أخرى. يبدو أن فكرة وجود تيار الخليج كتيار مفرد متصل طوال المسافة بين فلوريدا وأوروبا فكرة باطلة. وأقرب إلى الصواب أن نتصور أن التيار يتكون من غدائر تجري بسرعة عالية وتفرق بينها تيارات مضادة . وباستخدام جميع الوسائل الحديثة استطاع «ل.ف. ورثنجتون» (L.V. Worthington) بمعهد «وودزهول» أن يؤيد هذه النظرية تأييداً راسخاً، وذلك بالدراسة المفصلة للقطاعات المستعرضة. ففي قطاع مستعرض يبلغ طوله ٣٠ ميلاً استطاع «ورثنجتون» أن يميز وجود ثلاثة غدائر كبرى

متفرقة، يتدفق كل منها بسرعة ٣ أميال في الساعة. وتبعه «جونتر ورثهايم» (Gunther Wertheim) بمعهد «وودزهول» أيضاً فأوضح تعقيد تيار الخليج وميله التغير عندما اكتشف أن انتقال الماء بواسطة قطاع فلوريدا للتيار يتضاعف شهراً بعد شهر. وقد حسب تحرك الماء بقياسه للجهد الكهربائي بين «هافانا» و«كيوست» مستخدماً اقطاباً مثبتة إلى أسلاك تلغراف ولايات الاتحاد الغربي بين تلك النقطتين.

وقد أقنع «فوجلستر» نفسه بأن تيار اليابان أيضًا يمكن أن يتكون من غدائر. وفي الحق أنه أينما نظر المرء وجد جو المحيط متقلباً. وقد وجد «هنري ستوميل»أن التيارات شديدة التغيير، فكلما اشتدت الريح أو هدأت تولد عنها تيار دوار.

وفيما يلي أسوق استنتاجي من النظرية الجديدة المتعلقة بطقس المحيط. تتحرك المياه في عرض البحر حركة متغيرة وغير منتظمة إلى حد كبير. وإذا أطلقنا بالبحر علامة عائمة، فيمكننا أن نتوقع أن التيار ينقلها مسافة تقرب من نصف الميل في الساعة، غير أن السرعة والاتجاه يتغيران تماماً من يوم لآخر. هذه الحركة غير المستقرة – أو «ضوضاء» تيار المحيط – تمثل بطريقة ما تجاوب البحر مع الضربات المتعددة التي يتلقاها من الرياح التي تهب فوق سطحه. وليس التجاوب بسيطاً، كما أن العلاقة الرياضية التي تنطبق عليه ليست معروفة بعد. وواضح أن الطقس العارض للمحيط لا يسهم في مقاومة التيارات الجوية صاعاً بصاع كما تفعل التيارات المناخية البطيئة.

ويمكن بصورة عامة فقط أن نربط بين التركيب الدقيق لتيارات المحيط وبين التيارات المناخية. ومن الواضح أن هذا ناشيء عن أن التيارات العنيفة لا يمكنها أن تبدد كل الطاقة التي يكتسبها المحيط من الرياح، إلا أن السبب الذي يكسب تيارات المحيط هذا التركيب الدقيق يعتبر مشكلة تفتقد إلى المزيد من الدراسة والبحث.

القسم الخامس

الغلاف الجوي

الجزء الأول: الدورة الجوية

هاري ويكلسر

اهتم هاري ويكلسر بتقدم علم الأرصاد الجوية حين عهد إليه برئاسة قسم الخدمات العلمية في مكتب الطقس التابع للولايات المتحدة.

وقد سبق له دراسة الأرصاد الجوية في معهد «ماساشوستس» للعلوم التطبيقية بعد تخرجه من كلية هارفارد عام **١٩٣٢**. وقد عمل أثناء الحرب العالمية الثانية في مكتب الجو التابع لسلاح الطيران. وهو الآن رئيس الهيئة العلمية التي أوفدتها الولايات المتحدة لدراسة القطب الجنوبي ضمن برنامجها للسنة الجيوفيزيائية الدولية.

الجزء الثاني: الطبقة الجوية المتأينة (الأيونوسفير).

ت. ن. جونييه

الكاتب هو رئيس أبحاث طبقات الجو العليا في قسم طبيعة انتشار الأمواج اللاسلكية التابع للمكتب الأهلي للمقاييس. ولد في ميامي – فلوريدا – وحصل على بكالوريوس وما جيستير العلوم من جامعة فلوريدا. وفي عام ١٩٤٢ ترك جامعة «شمال كارولينا» حيث كان يجري أبحاثه، ليعمل أثناء الحرب في مكتب المقاييس قسم الراديو. ولا يزال «جونييه» في منصبه هذا حتى الآن.

الجزء الثالث: الوهج القطبي والوميض الجوي

س. ت. إيلفي، فرانكلين. أ. رواش

كان المؤلفان زميلين في مرصد «مكدونالد» في «تكساس» حيث اشتركا في دراسة الوميض الجوي عام ١٩٣٥ – ١٩٣٦ ويعمل «إيلفي» الآن مديراً لمعهد الفيزياء الأرضية بجامعة ألاسكا. وقد حصل على الدكتوراة في طبيعة الكون (Astrophysics) من جامعة شيكاغو عام ١٩٣٠، وفي أثناء الحرب العالمية الثانية اشتغل بأبحاث الصواريخ في معهد «كاليفورنيا» للعلوم التطبيقية.

ويشغل «روش» الآن مركز مستشار في قسم طبيعة انتشار الأمواج اللاسلكية في مكتب المقاييس الوطني. وقد حصل على درجة الدكتوراة في طبيعة الكون من جامعة شيكاغو عام ١٩٤٣، وقضى معظم السنوات التالية في مراصد «يركس» و «بيركنز» و «مكدونالد».

الجزء الرابع: ظاهرة الصفير

ل. س. و. ستوري

الكاتب فيزيائي انجليزي تخصص في علم الراديو، ويعمل الآن في مؤسسة المواصلات اللاسلكية في مكتب أبحاث الدفاع في كندا. تخرج «ستوري» من جامعة كمبردج عام ١٩٤٨ وحصل على مرتبة الشرف الأولى المضاعفة في العلوم الفيزيائية، ومن ثم تابع أبحاثه في «ظاهرة الصفير في المواصلات اللاسلكية» في معمل «كافندش» تحت إشراف ج. أ. رانكليف» (J. A. Rateliffe)

وقد عمل بعد ذلك مدة أربع سنوات في مؤسسة أبحاث الرادار البريطانية في «مالفرن» وهي السنوات التي كان فيها «كلف الشمس» أقل ما يمكن. والآن وقد عاد كلف الشمس إلى نشاطه ثانية فقد نشط ستوري بدوره وعاود دراسته لهذا الكلف مساهمة منه في برنامج السنة الجيوفيزيائية الدولية.

الدورة الجوية

هاري ويكلسر

نحن مدينين للغلاف الجوي بعدة أمور لا يحتاج إنسان إلى أن نذكره بها، ونعني بها الأكسجين، والرطوبة، والوقاية ضد إشعاعات الشمس القاتلة. ولكن من بين صفات الغلاف الجوي الواهبة للحياة نجد أن حركته هي أهم تلك الصفات، وتلك حقيقة غاية في الوضوح إلا أنه يطيب للناس عن غير قصد ألا يعيروها التفاتاً. ولنتصور ما يمكن أن يحدث لو أن الغلاف الجوي حول الأرض أصابه سكون مميت. فالرياح توزع الحرارة من المناطق الاستوائية غلى المناطق الأخرى، وتنقل الرطوبة من المحيطات وتسقط المطر على القارات، وتدفع هواء المدن الفاسد بعيداً وتستعيض به الهواء النقي. أما العالم الذي رياح فيه فإن درجة حرارته ترتفع في المناطق الاستوائية إلى حد لا يطاق، ويجثم برد مروع فوق المناطق الأخرى، وتجف القارات وتتحول إلى تراب بينما تختنق المدن.

ولحسن طالع الإنسانية أن الغلاف الجوي يتميز بدورته العامة التي تجعل الهواء في حركة دائمة سريعة حول الكرة الأرضية، يوماً بعد يوم، وسنة تلو أخرى. والطاقة اللازمة لدفع الغلاف الجوي للقيام بهذه الدورة طاقة هائلة. فالرياح ذات طاقة حركة أكبر من مجموع الطاقة الكهربائية التي تولدها محطات الولايات المتحدة طوال قرن. ويجب أن تتجدد هذه الطاقة باستمرار لأن ما يفقد منها بالاحتكاك بين الرياح والتضاريس

الأرضية كبير جداً، وإذا لم تزود الرياح بطاقة جديدة لا تلبث أن تفقد جميع طاقتها في مدة تتراوح بين ٩ أيام، ١٢ يومًا والشمس بطبيعة الحال هي مصدر هذه الطاقة فبتسخين الهواء وتبخير الماء تتولد أشكال من الطاقة تتحول إلى حركة في الهواء.

ودورة الرياح في الغلاف الجوي ترجع إلى أن المنطقة الاستوائية من الأرض والمنطقة الدوستوائية (مابين خط الاستواء وخط عرض ٣٨º) تمتصان من الاشعاع الشمسي أكثر مما تشعان، بينما تشع بقية مناطق الأرض أكثر مما تستقبل من هذا الإشعاع. ونتيجة لذلك فإن الهواء الساخن في المناطق الاستوائية يتجه نحو القطبين. هذه الحركة الرئيسية تسبب دورة الرياح في الغلاف الجوي حول الأرض. أما مناطق الارتفاع والانخفاض، ونظام الرياح على خرائطنا الطقسية فلاتبدو بجانب هذه الدورة سوى دوامات ضئيلة الشأن.

ويحاول علماء الأرصاد منذ ٢٠٠ عام أن يحصلوا على صورة لما يجب أن تكون عليه الدورة العامة غير أن معظم أبحاثهم لا تعدو أن تكون نظرية، لأنه حتى في الوقت الحاضر ليس لدينا سوى القليل من المعلومات عن طبقات الجو العليا لتخطيط الدورة العامة تخطيطاً شاملاً من واقع الأرصاد المباشرة. هذا والمحيط الهوائي الذي نعيش فيه من الاتساع بحيث لو تقاسمه أفراد البشرية جميعًا متعاونين في تسجيل الأرصاد كل فيما يخصه لكان نصيب الفرد منهم مليوني طن من الهواء.

والآن نلقي نظرة على تطورات الصورة التقليدية المفترضة للدورة الهوائية العامة للغلاف الجوي. ولنبدأ بتخطيط بسيط آخذين في حسابنا عامل الحرارة فقط. يرتفع الهواء القريب من خط الاستواء عالياً في الجو، ثم ينساب نحو القطبين الشمالي والجنوبي حيث يبرد وينخفض ثم يتحرك بعد ذلك وهو على ارتفاع منخفض نحو خط الاستواء. تشكل الدورة الهوائية في هذه المرحلة الابتدائية حلقة رأسية هائلة بين الشمال والجنوب في نصف الكرة الشمالي، وحلقة مماثلة في نصف الكرة الجنوبي.

وفي المرحلة التالية نأخذ في الاعتبار تأثير دوران الأرض. فالهواء لا يتحرك نحو القطب فحسب، لكنه يتحرك أيضاً من الغرب إلى الشرق تبعاً لدوران الأرض. ويدور الهواء عند خط الاستواء بسرعة مماثلة لسرعة دوران الأرض، وكلما اتجهنا نحو القطب نجد أن سرعة دورانه تتزايد بسبب اقترابه من محور الدوران، وذلك من أجل المحافظة على بقاء كمية حركته الزاوية ثابتة، ويحاكي في ذلك تماماً ازدياد سرعة الدوران لراقصة الباليه حول طرف قدمها عندما تضم ذراعيها نحو جسدها. وعلى هذا تنشأ في الهواء المتجه نحو القطبين في الطبقات العليا رياح غربية. أي رياح متحركة من الغرب إلى الشرق بسرعة أكبر من حركة دوران سطح الأرض. وبالعكس فإن الهواء القريب من سطح الأرض والمتجه إلى خط الاستواء تتناقص سرعته الدورانية كلما ابتعد عن محور الدوران، فتنشأ بذلك الرياح الغربية، حيث تقل سرعة هذا الهواء عن سرعة دوران سطح الأرض.

وبحساب سرعة هذه الرياح الشرقية والغربية يتبين أنها قد تبلغ مئات أو آلاف الكيلو مترات في الساعة. ولكن هناك عاملاً ثالثًا يجب إضافته إلى النموذج العام للدورة الهوائية ألا وهو الاحتكاك. فعندما يتلامس الهواء المتحرك مع سطح الأرض فإن سرعته النسبية (بالنسبة إلى حركة الأرض الدورانية) تقل بسبب الاحتكاك. وقوى الاحتكاك هذه وهذا التناقص في عجلة الهواء يغيران من الصورة التي وضعناها لحركة الهواء، إذ تنقسم الحلقة الشمالية الجنوبية إلى خليتين أو ثلاث خلايا رأسية في كل من نصفي الكرة، واحدة فوق المنطقة الاستوائية وواحدة فوق المناطق المتوسطة وربما واحدة في المنطقة القطبية.

والمفروض في التخطيط التقليدي، أن هذه الخلايا هي التي تنشأ عنها الرياح الشرقية الاستوائية (الرياح التجارية). ويوجد الآن دليل ثابت إلى حد ما بالنسبة إلى الخلية الاستوائية التي يطلق عليها اسم خلية «هادلي» نسبة إلى عالم الأرصاد الانجليزي «جورج هادلي» George Hadley الذي افترض وجودها منذ ٢٠٠ عام، وأشار إلى أن هذه الخلية الاستوائية يمكن أن تفسر الرياح التجارية والرياح المضادة لها فوق المحيطات الاستوائية.

كذلك يوجد بعض الدليل الذي يسند وجود الخلية المتوسطة التي سميت باسم «وليم فيريل» (William Ferrel) وهو عالم أمريكي افترض منذ ١٠٠ عام أنها موجودة.

ومنذ عهد قريب قام عالم الأرصاد الجوية الفنلندي «أ. بالمين» (E. Palmén) بإدخال تعديل على نموذج الخلايا بأن استبعد الخلية القطبية بدعوى أن الدورة الهوائية في المنطقة القطبية تكاد تكون أفقية بأكملها وعلى شكل دوامات، ولكنه استبقى خليتي «هادلي وفيريل» (انظر شكل ١٣) واستناداً إلى الصورة الحالية التي تدعمها تجارب المعمل باستخدام نماذج تتميز بحركة آلية دورانية فإن هذه الحلقات الرأسية والدوامات الأفقية دوراً هاماً في الدورة الهوائية العامة للغلاف الجوي وأثر الحلقات الرأسية أوضح عند خطوط العرض المنخفضة. والدوامات الأفقية المذكورة عبارة عن رياح دائرية في حجم مناطق الارتفاع والانخفاض في خرائطنا الطقسية. ومن المحتمل وجود دوامات ذات أحجام مختلفة في الغلاف الجوي، ولكننا لا نستطيع أن نلمس وجود الدوامات الصغيرة لأن محطاتنا عادة متباعدة جداً.

على هذا يكون لدينا نموذج مقبول يخطط حركة الهواء في الغلاف الجوي. والآن نلقي نظرة على حمولة هذا الهواء المتحرك

والمادة الأولى في هذه الحمولة عبارة عن كمية الحركة المكتسبة من الأرض. فالرياح القادمة من الشرق في اتجاه مضاد لدوران الأرض تلتقط بعض كمية حركتها الغربية لدى احتكاكها بها. وحيث أن الغلاف الجوي لا يحتمل أن يحدث تغييراً في معدل دوران الأرض فإن كل ما حصلت عليه الرياح الشرقية من كمية حركة يجب أن تعيده الرياح الغربية إلى الأرض. وهذا يعني أن ما حصلت عليه الرياح الشرقية التي تسود المناطق

الاستوائية والقطبية، يجب أن تنقله الرياح الغربية إلى خطوط العرض المتوسطة، حيث تعود هذه الرياح الغربية. وتشير الأدلة الحالية إلى أن معظم هذا الانتقال يتم عن طريق الدوامات الأفقية أكثر مما هو عن طريق الحلقة الرأسية الشمالية الجنوبية. وتنقل أكبر كمية من الحركة الدورانية عند خط العرض ٣٠º والذي يسمى «خط عرض الفرس». وتكاد حركة الهواء أن تكون منعدمة عند هذا الخط قرب سطح البحر، بينما تهب رياح خفيفة من الغرب قرب طبقة الأستراتوسفير (على ارتفاع ٤٠,٠٠٠ قدم تقريبًا).

والمادة الرئيسية الثانية في حمولة الغلاف الجوي هي الطاقة حيث يظهر بعضها على صورة حرارة والبعض الآخر على صورة طاقة حركة. وكما رأينا، فإن الطاقة الواردة من الشمس تنتقل من المناطق الاستوائية نحو القطبين. ومن الممكن أن نحسب بصورة تقريبية كمية الطاقة التي يجب أن تنقل في السنة. واستناداً إلى أرصادنا تقوم الدوامات الأفقية بكل عملية النقل نحو القطبين ابتداء من خط عرض ٥٥º ولكن ليس دون ذلك من خطوط العرض. فمثلاً عند خط العرض ٣٠º تنقل هذه الدوامات أقل من نصف الطاقة التي يجب نقلها. وليس بمقدورنا أن نفسر سبب هذا الفرق، فربما توجد أخطاء في عملية الحساب، كما انه من المحتمل أن تقوم حلقتا «هادلي وفيريل» بنصيب في هذا النقل، أو أن التيارات في المحيطات تحمل من الطاقة أكثر مما قدرناه.

أما المادة الثالثة في حمولة الغلاف الجوي فهي البخار. وهو في الواقع نوع من الطاقة المنقولة لأنه يمثل الحرارة الكامنة. وبالمثل عندما نقدر كمية البخار التي تنقلها الدورة الهوائية الأفقية والرأسية نلاحظ أن الدوامات الأفقية تنقل كل الحمولة في الخطوط العليا وليست في الخطوط المنخفضة من خطوط العرض.

ويبدو أن هذا يؤكد الاستنتاج القائل بأن حلقة «فيريل» تقوم بدور هام في نقل الطاقة إلى القطبين. وتدل الأرصاد كذلك على أن تكشف بخار الماء في مناطق شمال خط العرض ٣٨º يزيد على البحر عند السطح، بينما العكس صحيح في المناطق جنوبي خط عرض ٣٨º، باستثناء حزام منطقة الأمطار الاستوائية.

تتم هذه الدورة التي بحثناها في طبقة التروبوسفير وهي المنطقة التي تشمل الجزء الأسفل من الغلاف الجوي حتى الارتفاع ٣٠٠٠٠ إلى ٥٠٠٠٠ قدم ثم نتساءل هل توجد دورة هوائية بين طبقة التروبوسفير والاستراتوسفير التي تعلوها؟ ويبدو، بصورة مبدئية، إن وجود مثل هذه الدرة غير محتمل، حيث أن الميل الحراري الحاد عند السطح الفاصل بين الطبقتين يشكل سقفاً فوق طبقة التروبوسفير مما يجعل الهواء إلى أعلى مستحيلة. غير أنه يوجد الكثير من الأدلة على أن هواء كل من المنطقتين يختلط بعضه بالآخر. فمثلاً نعلم أن الهواء حتى ارتفاع ٤٠ ميلاً له نفس التكوين الغازي، ونعلم كذلك أن الهواء الجاف تماماً في طبقة الاستراتوسفير يتحرك إلى أسفل نحو سطح الأرض وأن الهواء الرطب الذي في طبقة

التربوسفير يتحرك إلى أعلى نحو طبقة الاستراتوسفير. وأقوى دليل حاسم على هذا الامتزاج الرأسي أن بعض الغازات التي تتكون في طبقة الاستراتوسفير أو تحتها بقليل، مثل الأوزون والكربون ١٤، والبريليوم ٧، والأرجون ٣٧، تهبط إلى أسفل ويمكن ملاحظة وجودها في الهواء القريب من سطح الأرض.

كيف يتهيأ للهواء أن يخترق هذا الحاجز المفترض (التروبوبوز) بين طبقتي التروبوسفير والاستراتوسفير؟ يمكننا استنباط الإجابة عن هذا السؤال من نموذج «بالمين» ففي الجانب المتجه إلى القطب من كل من حلقتي «هادلي وفيريل» توجد فجوة في «التروببوبوز» كما هو موضح بالشكل (١٣). يتسرب الهواء من طبقة التروبوسفير إلى طبقة الاستراتوسفير وبالعكس خلال هذه الفجوة. وعلى امتداد هذه الفجوة تهب رياح غربية أفقية سريعة. وأحد هذين التيارين هو «نافورة الجبهة القطبية»، بينما يسمى التيار الآخر «بنافورة الجبهة الدوستوائية».

بحثنا حتى الآن دورة الرياح في الغلاف الجوي على أساس أنها نظامين مختلفين تماماً، أحدهما في نصف الكرة الشمالي، والآخر في النصف الجنوبي. وفي الواقع يوجد تبادل في الهواء بين نصفي الكرة الأرضية. واستناداً إلى قراءات ضغط الهواء نلاحظ أن وزن الهواء في نصف الكرة الشمالي هو في الصيف أقل قليلاً منه في فصل الشتاء. وهذا يعني أنه لابد وأن بعض الهواء يتدفق إلى النصف الجنوبي ويتم معظم هذا الانتقال في فصل الربيع للنصف الشمالي من الكرة الأرضية. وعند نهاية فصل الشتاء

في النصف الجنوبي يبدأ تدفق عكسي من النصف الجنوبي إلى النصف الشمالي.

ويأمل علماء الأرصاد الجوية أن يتمكنوا من الحصول على صورة واضحة لدورة الرياح في الغلاف الجوي في أثناء السنة الجيوفيزيائية الدولية. حيث يعتزمون إنشاء عدة سلاسل من المحطات تنتشر بين القطبين وربما تقع إحدى هذه السلاسل بين خطي الطول ٧٠º، 80º غرباً، فتبدأ قرب القطب الشمالي مارة بالجزء الشرقي من أمريكا الشمالية وعلى امتداد الساحل الغربي لأمريكا الجنوبية حتى المنطقة المتجمدة الجنوبية كما أن في النية إنشاء سلاسل أخرى على امتداد خط الطول ١٠º شرقًا (أوروبا وأفريقيا) وعلى امتداد خط الطول ١٤٠º شرقًا (سيبيريا واليابان واستراليا). كما أن من المحتمل أيضاً أن تتصل هذه المحطات بعضها ببعض لتشكل سلاسل على امتداد عدد من خطوط عرض.

وسوف تحصل كل سلسلة من المحطات يومياً على صورة لمقطع الغلاف الجوي حيث يقاس الضغط، ودرجة الحرارة، والرياح عند ارتفاعات مختلفة حتى ١٠٠,٠٠٠ قدم، وبهذا تمتد مشاهداتنا حتى بالطبقة المتأينة، وهكذا يحتمل أن توضح لنا الأشعة فوق البنفسجية الواردة من الشمس سبب اضطراب الجو عند سطح الأرض في بعض الفترات.

وسوف تقوم هذه المحطات أيضاً بأرصاد أخرى عديدة، منها دراسة شدة الإشعاع الشمسي، وقياس ثاني أكسيد الكربون ودراسة تأثيره في

تدفئة سطح الأرض. كما تقوم الطائرات يومياً بدراسات بدائية فيما إذا كان بياض الثلج والجليد والسحاب فوق مساحات واسعة يمكن أن تعتبر دليلاً على التغيرات التي تطرأ على الطقس على نطاق واسع.

وقد لا تكون المشاهدات في منطقة الجليد الجنوبية أقل أهمية في محيط دراسات الأرصاد الجوية فالمحطات السبع المزمع إنشاؤها فوق القارة المتجمدة ستقوم بأول عملية استكشاف لطقسها. وحيث أن المنطقة المتجمدة الجنوبية أكثر مناطق الأرض برودة وأشدها استمراراً في انخفاض الضغط، فإن أثرها في الطقس في عالمنا ربما يكون أكبر بكثير مما تصوره لنا سعتها أو بعدها عنا.

الطبقة الجوية المتأنية .. (الأيونوسفير)

ت. ن. جوتبيه

منذ ثلاثة أرباع القرن حاول عالم الفيزياء والأرصاد الجوية الاسكتلندي «بلفور ستيورات» (Balfour Stewart) أن يفسر التغيرات اليومية التي تطرأ على المغناطيسية الأرضية فاقترح ما بدا آنذاك فكرة بعيدة الاحتمال، وفحواها أنه يوجد بالطبقات العليا من الجو طبقة هوائية موصلة للكهرباء، وأن حركة هذا الهواء واختراقه للمجال المغناطيسي الأرضي تولد تيارات كهربائية، وهذه بدورها تحدث مجالات مغنطيسية يمكن الاستناد إليها عند التغيرات اليومية في القياسات المغناطيسية.

ونظراً إلى أن طبقات الجو العليا كانت آنذاك مجاهل لم تطرقها آلة من صنع الإنسان فإن ما تضمنه فكرة «ستيوارت» الرائعة لم تلق قبولاً عاماً. ولكن في عام ١٩٠١ عندما أرسل «جوليلمو ماركوني» (Guglielmo. Marconi) إشاراته اللاسلكية عبر المحيط الهادي وحول سطح الأرض المنحني، أثارت طبقات الهواء العليا اهتماماً جديداً. وأفاق الفيزيائيون يفترضون أن أمواج الراديو التي تعبر الأفق تواصل مسارها خلال الغلاف الجوي في خط مستقيم ثم تتبدد في الفراغ. ولتفسر إرسال «ماركوني» للإشارات اللاسلكية البعيدة المدى حول الأرض أحيا كل من «آرثر كنيللي» (Arthur E. Kennelly) في الولايات المتحدة

«وأوليفر هيفيسايد» (Oliver Heaviside) في انجلترا كل على حدة، فكرة وجود طبقة متأينة في الجو العلوي تسبب انعكاس الموجات اللاسلكية إلى الأرض.

مضى بعد ذلك ما يناهز ربع القرن دون الحصول على المزيد من المعلومات عن هذه الطبقة، إلى أن استطاع «إدوارد أبلتون» (Edward Appleton) و«م. أ. ف. بارنيت» (M. A. F. Barnett) في انجلترا في أواخر عام ١٩٢٤ أن يجدا دليلاً مباشراً هاماً على وجود هذه الطبقة المتأينة عندما أخذا قياسات دلت على أن أمواج الراديو الصادرة من محطة بعيدة عادة إلى الأرض مائلة بزاوية معينة. وبعد شهور قليلة تحقق وجود الطبقة المتأينة وتحدد مكانها بشكل نهائي. ففي صيف عام ١٩٢٥ قام كل من العالمين الفيزيائيين جريجوري برايت (Gregory Breit) وميرل توف (Merle Tuve) بقسم المغنطيسية الأرضية في معهد «كارنيجي» بواشنجتن بتجربة تاريخية بالتعاون مع معمل أبحاث البحرية الأمريكية في «البوتوماك». أرسلت نبضات قصيرة من أمواج الراديو من مرسل أبحاث البحرية المذكورة إلى السماء مباشرة. وعلى بعد ثمانية أميال استقبل «برايت» و «توف» صدى هذه النبضات بجهاز استقبال، وسجلاها على رأسهم للذبذبات (وكان هذا أول إخراج لفكرة الردار) وبتوقيت هذه النبضات أمكن حساب ارتفاع الطبقة العاكسة. وعندئذ لم يكن هناك أدنى شك في وجود طبقة متكهربة أو متأنية من طبقات الغلاف الجوي. وكان عنوان المقال الذي نشره «برايت» و«توف» عن هذه التجربة هو «تجربة أثبتت وجود الطبقة الموصلة للكهرباء».

والطبقة المتأنية عبارة عن رداء كثيف من الهواء المتأين، عرف الآن أنه يتألف من أربع طبقات مختلفة، تشغل المنطقة التي تقع بين الارتفاع ٤٥ ميلاً و ٢٠٠ ميل فوق سطح الأرض. وترجع خصائصها الكهربائية إلى وجود الالكترونات الحرة والذرات والجزيئات المتأنية (بعضها موجب الشحنة والبعض الآخر سالبها). والسبب الرئيسي لهذا التأين هو الأشعة فوق البنفسجية الصادرة من الشمس. هذا الإشعاع تمتصه الطبقات العليا من الجو بحيث يتعذر الكشف عنه عند سطح الأرض.

واستجابة لسيول من الجسيمات والاشعاعات القادمة من الشمس ولقذائف الشهب، وكذلك لجاذبية الشمس والقمر التي تحدث مداً وجذراً في الغلاف الجوي، فإن الطبقة المتأنية تبدو كالبحر الهائج، فهي تتغير من ساعة لساعة، ومن يوم ليوم، ومن فصل لفصل، وفي بعض الأحيان تتعرض لعواصف كهربائية ومغنطيسية هائلة.

ومن وجهة الحياة العملية، نجد للطبقة المتأنية أهمية خاصة من الناحية التطبيقية والاقتصادية. فبدونها يستحيل استعمال المواصلات اللاسلكية ذات المدى البعيد. غير أن اضطرابات الطبقة المتأينة وتموجاتها تتدخل في نفس الوقت تدخلاً ضاراً بهذه المواصلات. ففي بعض الأحيان تكون سببًا في ضعف استقبال هذه الأمواج في مساحات كبيرة من الأرض، وفي أحيان أخرى تسمح هذه الطبقة باستقبال أمواج التليفزيون لمسافات مذهلة حول الأرض.

والإلكترونات الحرة في الطبقة المتأينة هي التي تلعب الدور الرئيسي في أثر هذه الطبقة على أمواج الراديو. فعندما تدخل موجة الراديو الطبقة المتأينة تتأرجح هذه الإلكترونات إلى الأمام وإلى الخلف بسبب المجال الكهربائي للموجة. وكل إلكترون متحرك يصبح مولداً لموجة لاسلكية لها نفس ذبذبة الموجة الساقطة. يتجه جزء من هذه الإشعاعات الجديدة إلى أعلى في اتجاه الموجة الساقطة، وينطلق الجزء الآخر إلى أسفل في الاتجاه الذي قدمت منه هذه الموجة. وكلما تعمقت الموجة في الطبقة المتأينة تقابل كثافة أكبر في الالكترونات، وهكذا تتناقص طاقة الموجة تدريجياً إلى أن يقف تقدمها إلى أعلى، ولا يبقى غير إشعاعات الالكترونات المتجهة إلى أسفل. وبمعنى آخر، تنعكس الموجة الساقطة (لا تساهم الذرات المتأينة والجزيئات المتأينة إلا بنصيب ضئيل في عكس هذه الأمواج بسبب ثقلها بالنسبة للالكترونات، مما يجعلها تستجيب بشكل ضعيف لأمواج الراديو).

تنعكس الموجة اللاسلكية أثناء اختراقها سحابة من الالكترونات عندما تزداد كثافة الالكترونات الطليقة في هذه السحابة بحيث يصبح عددها في المليمتر المكعب الواحد مساوياً ١٢,٤ مرة قدر مربع تردد الموجة مقدراً بالميجاسيكل (مليون سيكل) لكل ثانية. فمثلاً إذا كان تردد الموجة خمسة ميجاسيكل في الثانية فإنها تنعكس عندما تكون كثافة الالكترونات ١٢,٤ × ٢٥ أي ٣١٠ إلكترون في كل مليمتر مكعب واحد.

وهكذا يمكن تعيين الالكترونات وكذلك ارتفاع كل طبقة عاكسة في الأيونوسفير بأن نرسل إشارات لاسلكية ذات ترددات مختلفة. وبطبيعة الحال توجد عوامل معقدة تدخل في الحسابات، منها المجال المغناطيسي للأرض، والذي يجعل من الأيونوسيفر وسطاً تنكسر فيه الأمواج اللاسلكية انكساراً مزدوجاً، بمعنى أنه يقسم الأمواج إلى مركبتين. ومن العوامل المعقدة أيضاً تباطؤ الموجة اللاسلكية أثناء اختراقها لطبقة تتزايد فيها كثافة الالكترونات. يستدعى هذا التأخير إجراء تصحيح عند تعيين ارتفاع الطبقة العاكسة، حيث أن أساس قياس الارتفاع هو الزمن الذي تستغرقه الموجة اللاسلكية باعتبار أنها تتحرك بسرعة الضوء.

ويسمى الجهاز الذي يستخدم في الكشف عن الطبقة المتأينة «بالأيونوسوند» وهو يتركب من مرسل للإشارات اللاسلكية ومن مستقبل يسجل صداها، وكلاهما في صندوق واحد. وعند إجراء التسجيل للحصول على ما يسمى «بالأيونوجرام» يوفق المرسل والمستقبل بسرعة للعمل في نطاق معين من الذبذبات، ونعرض الأصداء على شاشة راسم الذبذبات وتصور. وعندئذ تكون المسافة بين خط الأساس الذي يمثل زمن الإرسال وبين المسار الذي يوضح عودة الصدى، مقياساً للزمن الذي استغرقته الموجة ذهاباً وإياباً.

ويرمز لأقل الطبقات المتأينة ارتفاعاً بالرمز (د) ولم يتم قياس كثافة الالكترونات في هذه الطبقة قياسًا دقيقًا، ولكن من المعلوم أنها كثافة

صغيرة لأن هذه الطبقة لا تعكس الموجات التي تبلغ ترددها واد ميجاسيكل فأكثر.

ويعلو الطبقة (د) ثلاث طبقات أخرى متأينة، حددت ارتفاعاتها وكثافة الالكترونات بها بدقة أكبر. هذه الطبقات هي طبقة «هـ» (وتمتد بين ارتفاع ٦٠ إلى ٩٠ ميلاً فوق سطح الأرض)، ثم طبقة «$و_{١}$» (بين ٩٠ ميلاً، ١٥٠ ميلاً) وأخيراً طبقة «$و_{٢}$» (فوق ١٥٠ ميلاً). وتتزايد كثافة الالكترونات من طبقة لأخرى. ولكنها تتغير في الطبقة الواحدة من النهار والليل ومن فصل إلى فصل. ونجد نهاراً في أكثف جزء من طبقة هـ ١٢٠ إلكترون في كل ملليمتر مكعب، وفي طبقتي $و_{١}$، $و_{٢}$ نجد على الترتيب ٢٢٠ إلكتروناً، ٤٥٠ إلكتروناً في الملليمتر المكعب.

وتتوقف ذبذبة الموجات المنعكسة على كثافة الإلكترونات. فكلما زادت كثافة الطبقة زادت ذبذبة الموجة التي تعكسها. ولهذا فإن طبقة «هـ» تعكس الأمواج التي تصل ذبذبتها إلى ٣ ميجاسيكل في الثانية (مرسلة في اتجاه رأسي) عندما تكون أقصى كثافة لها ١٢٠ إلكترون/ ملليمتر مكعب. وفي هذه الحالة نقول أن ٣ ميجاسيكل هي «الذبذبة الحرجة». فالذبذبات التي تزيد عن هذا المقدار لا تعكسها هذه الطبقة بل تنفذ منها إلى الطبقات التالية.

والتغير في تردد الذبذبات الحرجة التي تعكسها الطبقات المختلفة المكونة للأيونوسفير تكشف عن التغيرات التي تطرأ عليها، وهذا يشير إلى

تزايد أو تناقص كثافة الإلكترونات. فالكثافة، وهي في الواقع مقدار التأين، تزداد أثناء النهار عنها في الليل، ولكنها قد تقل في الصيف عنها في الشتاء. وتزداد الكثافة بتزايد نشاط الكلف الشمسي في دورة مدتها أحد عشر عاماً. كما توجد تغيرات أخرى مرتبطة بخطوط العرض الجغرافية والمغناطيسية وبالمد والجزر الناشئين عن جاذبية القمر والشمس، وكذلك بالرياح القوية التي توجد في الأيونوسفير.

وإلى جانب التغيرات المنتظمة نجد تغيرات أخرى عديدة أقل شأناً وتبدو غير خاضعة لنظام معين. فارتفاع الطبقات وكثافتها تتغير من دقيقة لأخرى بشكل لا يسوده أي نظام. وبعض هذا الشذوذ يعود إلى تقلبات الرياح في الطبقات العليا، وبعضها ناشيء عن تغيرات الأشعة فوق البنفسجية وتيارات من الجسيمات التي تحدث الوهج القطبي، وكذلك الشهب التي تهاجم الأيونوسفير وتسبب إلى حد كبير اضطرابات المنطقة هـ: فمرور شهاب في الطبقة المتأينة يضاعف التأين آلاف المرات وقت مروره وإن كان ذلك لا يستغرق أكثر من جزء صغير من الثانية.

وأحد أسرار الأيونوسفير الهامة هو نوع من عدم الانتظام الذي يلازم الطبقة هـ أحياناً حيث تعكس فجأة موجات اللاسلكي التي تنفذ عادة من الأيونوسفير بأجمعه وعلى هذا فإن التليفزيون الذي يحدد الأفق مداه عادة، يمكن استقباله في هذه الحالة على بعد مئات الأميال من المرسل.

والاضطرابات الكبيرة في المجال المغناطيسي للأرض، والتي تسمى أحياناً بالعواصف المغناطيسية، تحدث في الأيونوسفير تغيرات سريعة في كثافة الإلكترونات وخاصة في المنطقة و٢، كما تسبب عدم انتظام جزئي في التركيب الطبقي للأيونوسفير. والمعتقد أن هذه الاضطرابات ناشئة عن قذائف مركزة من الجسيمات تصدر عن الشمس.

تندفع هذه التيارات المركزة من الجسيمات في المجال المغناطيسي للأرض وتثير اضطرابات في المجال الأرضي، كما تولد تيارات كهربائية قوية تسبب تغيرات أخرى في المجال المغنطيسي للأرض. يشترك المجالان الكهربائي والمغنطيسي في إثارة المناطق المتأينة وإزاحة مجموعات من الأيونات، وهكذا تطغى هذه التغيرات السريعة على العمليات المنتظمة في إنتاج الإلكترونات وتجميعها وإعادة توزيعها عن طريق التداخل أو الرياح، ولذلك تتغير طبيعة الأيونوسفير تغيراً شديداً.

وتعاني طبقة الأيونوسفير تغيراً هاماً نتيجة انبعاث أضواء مفاجئة من الشمس تعرف بالانفجارات الشمسية. وينبعث مع كل انفجار شمسي كمية من الأشعة البنفسجية أو الأشعة السينية، يتلوها زيادة هائلة مفاجئة في التأين في الطبقة د. ونظراً لتضاعف عدد الجزيئات المتأينة فإن الطبقة د تمتص جزءاً كبيراً من طاقة الأمواج اللاسلكية المارة خلالها فيحدث ضعف مفاجىء في استقبال الموجات اللاسلكية. وقد تستغرق المنطقة د زمناً، يتفاوت بين دقائق قليلة إلى عدد من الساعات، لتستعيد تأينها المعتاد، ويتوقف هذا على درجة الاضطراب وشدته.

وتتغير كثافة الإلكترونات في الأيونوسفير فتتزايد وتتناقص في دورة تستغرق أحد عشر عاماً للكلف الشمسي. ففي الطبقة و٢ مثلاً قد تبلغ كثافة الإلكترونات (مقدرة بطريقة قياس الذبذبة الحرجة للأشعة المنعكسة) عندما يكون نشاط الكلف الشمسي في ذروته، ضعف كثافتها في حالة أدنى للكلف الشمسي. وواضح أن الإشعاع فوق البنفسجي والإشعاعات القصيرة يزداد مقدارها ازدياداً ملحوظًا عندما يكون النشاط الشمسي في ذروته. رغم أن الإشعاع في المدى المرئي يظل تقريباً على ما هو عليه. وحركة الطبقات العليا من الغلاف الجوي حيث توجد الطبقات المتأينة، تؤثر تأثيراً هاماً على توزيع التأين. ووجود المجال المغناطيسي الأرضي يزيد في تعقيد هذا التوزيع، إذ أن حركة الهواء المتأين خلال خطوط القوى المغناطيسية ينتج عنها مجال كهربائي. ويعرف هذا التأثير «بتأثير الدينامو». وهذا المجال الكهربائي يؤثر بدوره على عمليات التأين في المناطق المتخلفة من الغلاف الجوي. فحركة الهواء في المنطقة هـ قد تولد مجالاً كهربائياً يؤثر على التأين في المنطقة و٢. ومثل هذه التفاعلات بين الأيونوسفير والمجال المغنطيسي تكسب الأيونوسفير أنواعاً من المظاهر يصعب إدراكها.

يمكن التمييز بين الطبقات المختلفة في الأيونوسفير بقدرتها على عكس أمواج الراديو (المنحنى الأسود تدريج التردد العلوي) وبكثافة الإلكترونات (المنحنى المتقطع والتدريج السفلي). وعلى هذا فإن الطبقة هـ تعكس الأمواج في حدود ذبذبة قدرها ٣ ميجاسيكل. أما الذبذبات التي تزيد على هذا المقدار فتنفذ خلالها وفي هذه الطبقة تتزايد كثافة الإلكترونات تزايداً سريعاً كلما زاد الارتفاع، حتى ١٢٥ ميلاً، ثم تتزايد

بعد ذلك بمعدل أقل حتى ارتفاع ١٥٠ ميلاً حيث تبدأ الطبقة و. وتبلغ كثافة الإلكترونات أقصاها في الطبقة و٢ بين ارتفاع ٣٠٠ ميل وارتفاع ٤٠٠ ميل كما هو مبين في المنحنى المتقطع، وكذلك يتقارب الخطوط الأفقية. وثم يتم قياس كثافة الإلكترونات قياساً دقيقاً فيما دون الطبقة هـ وفيما وراء الطبقة و٢.

كان الجيوفيزيائيون يميلون إلى الأخذ بفكرة «بلفور ستيورات» القائلة بأن «تأثير الدينامو» للحركة المتذبذبة المتأينة في أعالي الغلاف الجوي هو سبب التغيرات اليومية في المجال المغناطيسي للأرض، إلا أنه مضت سنوات عديدة دون أن يكون من السهل الاقتناع بأن هذه الذبذبات يمكن أن تكون كبيرة ذات طور مناسب بحيث تفسر وجود التغيرات المغناطيسية المشاهدة. وقد وجد الجواب على ذلك في نظرية الرنين الحديثة التي تنبأت بأن ذبذبات الجو التي يحدثها المد والجزر بسبب جاذبية الشمس، يجب أن تظهر رنينًا فترته الزمنية ١٢ ساعة. وقد أوضح «س. ل. بيكريس» (C. L. Pekeris) بانجلترا أن الحركة التذبذبية للهواء فوق ارتفاع ٢٠ ميلاً يجب أن تكون في اتجاه مضاد لحركته عند سطح الأرض، وأن مدى الحركة يجب أن يتزايد بزيادة الارتفاع، بحيث أن هذا المدى في الجزء الأسفل من الأيونوسفير هو ٢٠٠ مرة قدر قيمته عند سطح الأرض. وهكذا فقد تنبأت هذه النظرية بوجود ذبذبة عند ارتفاعات مماثلة للأيونوسفير لها من الطور والمدى ما يكفي لتوليد تيارات كهربائية قادرة على إحداث التغيرات اليومية في المجال المغنطيسي الأرضي.

وفي عام ١٩٣٩ وجد كل من «ابلتون» و «ك. ويكس» (K. Wecks) في انجلترلا ذبذبة فترتها ½١٢ ساعة في الطبقة هـ تجعل الهواء يصعد ويهبط لمسافة تقرب من ميل. وينسب مصدر هذه الذبذبة إلى تأثير القمر الذي يستغرق مده وجزره فترة زمنية مساوية. وفي تسجيلات المعهد الجيوفيزيائي لطبقات الأيونوسفير في «بيرو» اكتشف أن للقمر تأثيراً واضحاً. فالذبذبة القمرية تقسم و٢ إلى شطرين. وقد أوضحت تسجيلات الصدى أن الشطر العلوي من هذه الطبقة يرتفع. وتحدث هذه الظاهرة في أثناء ساعات النهار فقط. وقد ظهر أن القمر هو سبب هذه الظاهرة. ويتضح ذلك من أن فترة تكرار تباعد الشطرين تتفق مع فترة الذبذبة القمرية للأيونوسفير.

ويمكن شرح هذا الأثر كما يلي: تولد الذبذبة القمرية للأيونوسفير مجالاً كهربائياً أفقياً كبيراً في اتجاه الشرق والغرب. يؤثر هذا المجال على تأين الطبقة و٢ في اتجاه عمودي على اتجاه المجال المغنطيسي للأرض فيسبب حركة الأيونات إلى أعلى. وفي نفس الوقت لا تزال أيونات جديدة تستحدث عند الارتفاع المعتاد بسبب الأشعة فوق البنفسجية القادمة من الشمس. وعلى ذلك، بينما ترتفع الطبقة القديمة تتشكل طبقة جديدة تحتها. وعندما يكون صعود الطبقة القديمة سريعاً إلى درجة كافية يحدث الانفصال الملاحظ بين الطبقتين.

وقد استحدثت عدة طرق لتتبع الرياح وحركة الهواء المتأين في الأيونوسفير ولعل أبسط جهاز لقياس سرعة الرياح في الأيونوسفير هو

ذلك الذي يستغل خاصية أن سطح الطبقة العاكسة يكون عادة غير منبسط تماماً ويشبه سطح البحر، وعلى ذلك تكون الموجة المنعكسة عليه غير منتظمة، وتختلف شدتها من مكان لآخر. وفي الطريقة المبنية على هذا الأساس ترسل الأمواج اللاسلكية في اتجاه رأسي ويسجل صداها بوساطة ثلاثة هوائيات عند رءوس مثلث طول ضلعه حوالي ١٠٠ ياردة. فإذا كان الهواء المتأين فوقها متحركاً في اتجاه أفقي فإن الشكل غير المنتظم للموجة المنعكسة يتحرك في نفس الاتجاه، وتبعًا لذلك يضعف الصدى. ويتكرر نوع ضعف الصدى الذي يحدث في هوائي عند هوائي آخر في اتجاه الريح (مثلاً بعد ثانيتين من الزمن) (انظر الشكل ١٥). وبهذه الطريقة يمكن تحديد السرعة واتجاه الحركة في الأيونوسفير. وليس لدينا ما يؤكد أن الشكل المتحرك الذي نحصل عليه يجب أن يدل على وجود رياح، إذ ربما يكون مجرد انعكاس حركة موجبة مثل أمواج بركة الماء، ولكن دلت القياسات لهذه الحركة على أن لها الكثير من صفات الرياح، والاحتمال الأقوى أنها فعلاً رياح حقيقية.

يمكن التعرف على رياح الأيونوسفير من التغيرات في شدة أمواج الراديو المنعكسة من السطح الأسفل الثائر للأيونوسفير (أعلى الرسم). والتغيرات في شدة الأمواج المنعكسة، كما نشاهدها باستقبالها بثلاثة هوائيات موزعة عند رءوس مثلث، يتضح شكلها على جهاز الاستقبال، ويتحرك تبعاً لحركة رياح الأيونوسفير سرعةً واتجاهاً.

وهناك تغيير في هذا الأسلوب يقضي بمتابعة الشكل غير المنتظم للأيونوسفير بتأثيره على الضوضاء اللاسلكية القادمة إلى الأرض من الفضاء الخارجي، إذ تتغير هذه الإشارات اللاسلكية بحركة الهواء المتأين عبر مسارها من مصدرها البعيد. ويمكن تحديد سرعة هذه الحركة واتجاهها يأخذ تسجيلاً عند ثلاث نقط مختلفة.

وقد استحدث «ل. أ.ماننج» (L. A. Manning) و «أ. ج. ڤيلارد» (O. G. Villard) و «أ. م. بيترسون» (A. M. Peterson) من جامعة «ستانفورد» طريقة طريفة ولكن أشد تعقيداً لقياس حركة الهواء في الأيونوسفير. فهم يتعابون حركة الشهب في الطبقة هـ بوساطة الرادار. فإذا سببت الرياح انحرافاً في الأثر المتأين خلف شهاب مار منهافي اتجاه جهاز الرادار المستقبل فإن تردد الموجة المنعكسة يزداد بنسبة سرعة الريح حسب قاعدة «دوبلر». أما إذا انحرف المسار بعيدًا فإن التردد يقل. وتستطيع بعض الأجهزة الحساسة قياس مدى الانحراف الناشيء عن تأثير«دوبلر»، حتى ولو كان زمن المسار جزءاً من الثانية. وتتفق النتائج المستخلصة بهذه الطريقة مع نتائج طريقة ضعف الصوت. وخلال نيف وخمسين عاماً التي انقضت على تجربة «ماركوني» تطور استغلال خاصية عكس الأيونوسفير للأمواج في خدمة المواصلات اللاسلكية البعيدة المدى تطورًا كبيراً وسار قدماً في طفرات واسعة.

وفي هذه الأيام نلاحظ أن نطاق الذبذبات التي يمكن عكسها على الأيونوسفير قد أصبح مزدحماً إلى درجة أن عدد كبير من المحطات قد

أخذت تتداخل الواحدة منها في الأخرى. وأحد أغراض أبحاث الأيونوسفير في المعاهد مثل معهد المقاييس الأهلي هو الحصول على معلومات أساسية عن أفضل الطرق للاستفادة من طيف الراديو المتوفر. وبالطبع من المهم معرفة الحد الأعلى للتردد الذي يمكن عكسه بوساطة الأيونوسفير. كما أن البيانات عن التأين التي توضح توزيع كثافة الالكترونات ضرورية لهذا الغرض. وتوجد الآن ٧٥ محطة في أنحاء العالم (باستثناء الموجود منها في الستار الحديدي) تقوم بمتابعة التغيرات في الأيونوسفير وتدير الولايات المتحدة أو تساعد في الإنفاق على ١٩ محطة وكل محطة تقوم بالتسجيل الأيونات مرة على الأقل في كل ساعة من ساعات اليوم. تجمع المعلومات من هذه السجلات وترسل إلى مركز تحليل المعلومات حيث يستفاد من النتائج في التنبؤ بالنهاية العظمى للترددات التي يمكن استخدامها.

ويقوم مكتب التسجيل الأهلي بعمل خرائط من هذا القبيل كل شهر. وتبين هذه الخرائط النهاية العظمى للتردد الذي يمكن استخدامه عند خطوط العرض الجغرافية المختلفة، والوقت المحلي المناسب لهذا الاستخدام. يمكن تطبيق كل واحدة من هذه الخرائط على الإرسال فوق مسافة معينة والانعكاس من طبقة معينة. كما يمكن استنباط مثل هذه المعلومات بالنسبة لمسافات أخرى بوساطة معادلة رياضية نشرت في مقال حديث.

ويركز برنامج الأيونوسفير في السنة الجيوفيزيائية الجهد للحصول على سجلات منتظمة خاصة بالأيونوسفير من أكبر عدد ممكن من المحطات

المعتمدة. سيكون هناك ثلاث سلاسل باتجاه الشمال والجنوب على امتداد خطوط الطول ١٠° شرقًا (أوروبا الغربية – أفريقيا الغربية)، ١٤٠° شرقًا (اليابان – استراليا)، ٧٥° غرباً (جرينلاند – أمريكا الجنوبية). وسيبذل مجهود خاص لإنشاء محطات قرب خط الاستواء المغنطيسي لدراسة طبقة و٢ عند هذه المناطق. وستنشأ سلسلة من المحطات في الاتجاه الشرقي – الغربي للكرة الأرضية حول خط الاستواء، ومجموعة من المحطات في منطقة الوهج الشمالي، ومجموعة أخرى من المحطات في قارة المتجمد الجنوبي. وسوف تنشأ محطة في القطب الجنوبي. فأي تغيرات هناك في الأيونوسفير مرتبطة بدوران الأرض يمكن أن تنسب إلى عدم تماثل المجال المغنطيسي للأرض، أو إلى عدم التماثل في دورة الهواء في الغلاف الجوي، حيث أن زاوية ميل أشعة الشمس لا تتغير في اثناء النهار. وسيكون من المفيد حقاً أن نعرف إلى أي مدى يتم الاحتفاظ بالأيونوسفير عند القطب خلال مدة تقارب ستة أشهر. حيث لا تصل أشعة مباشرة من الشمس إلى طبقة الأيونوسفير.

وقياس امتصاص الأيونوسفير للأمواج اللاسلكية يعد من المشروعات ذات الأفضلية الأولى للسنة الجيوفيزيائية. فمحاولات قياسها كانت أقل نجاحاً من محاولات قياس توزيع كثافة الإلكترونات. وتوجد طريقتان رئيسيتان لقياس هذا الامتصاص، تتوقف أحداهما على مقارنة شدة الموجة التي انعكست مرتين (رحلتان ذهاباً وإياباً بين الأرض والأيونوسفير) بصدى موجة انعكست مرة واحدة فقط. فالفرق في الشدة بين صدى الموجة التي انعكست مرة واحدة وتلك التي انعكست مرتين يعتبر مقياسًا للامتصاص

الذي عانته الموجة التي قامت بالرحلتين في أثناء رحلتها الثانية (مع عمل حساب الطاقة المفقودة في انعكاسها على الأرض، وحساب الزيادة في المسافة التي تقطعها). والطريقة الأخرى لدراسة خصائص الامتصاص في الأيونوسفير تتوقف على قياس التغير في شدة الأمواج اللاسلكية القادمة من الفضاء الخارجي.

ومن البرامج التي أحسن تخطيطها وتنفيذها نأمل أن نتمكن من تنمية معلوماتنا عن هذا العالم الذي نعيش فيه، وذلك فضلاً عن الفوائد الاقتصادية المترتبة على زيادة كفاءة استغلالنا لهذه الطبقة من الهواء المكهرب فوق رءوسنا.

الوهج القطبي أو الوميض الجوي

س. ت. إلفي ، وفرانكلين ي. روش

عبر السماء الشمالية المظلمة يبدأ يومض بضوء خافت مائل إلى الاخضرار. ثم لا يلبث هذا الشريط من الضوء أن تشتد إضاءته يرتفع في السماء على شكل قوس يمتد من الشرق إلى الغرب. وبينما يتحرك هذا الضوء نحو الجنوب يظهر المزيد من هذه الأشرطة، وبهذه الكيفية تزداد إضاءة السماء تدريجيًا ويتبدد ظلام الليل، وبعد ذلك تتفكك هذه الأشرطة فجأة وتمتلىء السماء كلها بالأشعة المتحركة بسرعة، وبالسطوح الضوئية التي تنطوي حيناً وتنفرد حيناً آخر، في لون أخضر يشوبه أحياناً اللونان الأحمر الفاتح والأرجواني. وإذ يرقب المرء هذا المشهد من الأرض يشعر بأنه غارق في خضم من الأضواء الخلابة المختلفة.

ومن بين الظواهر الطبيعية جميعها، تبدو ظاهرة الوهج أبعدها عن الواقع والوصف. فما كنهها؟ وما سببها؟ وهل يمكن أن يسبغ عليها شكل أو مظهر فيزيائي؟ وهل يمكن تحليلها وقياسها وتحديد مكانها أو تحديد أبعادها؟ الجواب عن ذلك بالطبع هو نعم، وكل هذا ممكن. وأن بعض الأسئلة التي كانت تراود الجنس البشري حول الأضواء الغريبة في الشمال والجنوب يمكننا الآن الإجابة عنها، وإن كان لا يزال أمامنا الكثير منها لنتعلمه عن هذه الظاهرة.

ويعتقد معظم الفلكيين والفيزيائيين أن سبب الوهج القطبي هو جيوش من الجسيمات المشحونة القادمة من الشمس إلى الأرض، يأسرها المجال المغنطيسي للأرض ويحملها نحو القطبين المغنطيسيين. وهذا يفسر سبب تعدد حدوث الوهج عند القطبين الشمالي والجنوبي. وعندما تخترق البروتونات الغلاف الجوي تتحد مع الإلكترونات لتنتج ذرات الإيدروجين. وهذا الاتحاد يتولد عنه ضوء. ولما كان هذا الإشعاع هو ضوء الإيدروجين فإن ذلك يدل على أن البروتونات تتساقط على الغلاف الجوي في الطور الأول من ظاهرة الوهج. أما الأطوار المتأخرة عن هذه الظاهرة، وخاصة عندما تنفصل لتكون الأشعة، فيبدو أن مردها حزم الإلكترونات المتساقطة. وعلى هذا فالعملية التي تؤدي إلى حدوث الوهج القطبي – وهو إثارة ذرات وجزيئات الغلاف الجوي لدى اصطدامها بالجسيمات المنهمرة – تشبه إلى حد كبير ما يحدث داخل مصابيح النيون.

وتميل أشعة الوهج إلى أسفل نحو الأرض على امتداد خطوط القوى المغناطيسية التي توجه الجسيمات المشحونة. وهي لا تصل الأرض بالطبع. وتدل الصور الفوتوغرافية التي أخذت للوهج القطبي من محطات مختلفة على أنه ينتهي عند ارتفاع ٦٠ ميلاً من سطح الأرض. ويمكن مشاهدة قاعدة الوهج على بعد ٦٠٠ ميل من النقطة التي تحتها مباشرةً على سطح الأرض. ويختفي الوهج فيما وراء ذلك لانحناء سطح الأرض.

ونتيجة لأرصاد استغرقت حوالي قرن من الزمان، توجد الآن خرائط وافية تحدد مساحات الأرض التي يمكن مشاهدة الوهج فيها، والتي يكثر

حدوثه عندها. وهذه الخرائط مبنية على خطوط العرض الهندسية. فالقطبان المغنطيسيان لا يقعان عند القطبين الجغرافيين. ويقع القطب المغناطيسي الشمالي في شمال غرب جرينلاند. وتقع المنطقة التي يكثر فيها حدوث الوهج في حزام يمتد إلى ٢٣º من القطب المغنطيسي في كل من نصفي الكرة الأرضية. ففي النصف الشمالي تمتد هذه المنطقة في «ألاسكا» بين «بوينت بارو» و «فيربانكس»، وعبر «كندا» حتى الطرف الجنوبي من «جرينلاند»، وكذلك فوق الطرف الشمالي من النرويج والسواحل الشمالية لروسيا وسيبيريا. وفي المنطقة بين خطي عرض ٦٠º، 45º المغنطيسيين يمكن مشاهدة الوهج من حين لآخر. وحدود هذه المنطقة تشمل تقريباً «سان فرانسيسكو» ومدينة «أوكلاهوما» و «ممفيس» و «أتلانتا» و «جزر الأزور» وشمال إيطاليا والأجزاء الجنوبية من الاتحاد السوفيتي وطرف شبه جزيرة «كامشاتكا». أما في جنوبي خط عرض ٤٥º فلا يشاهد الوهج إلا في العواصف المغناطيسية الناشئة عن اضطرابات عنيفة جداً في المجال المغناطيسي الأرضي.

ومن المعلوم أن احتمال ظهور الوهج يكون أكبر ما يمكن في شهري مارس وسبتمبر. وسواء كان ذلك يرجع إلى عدم استقرار الغلاف الجوي الأرضي أو إلى أن حزامي الكلف الشمسي الشمالي والجنوبي يتجهان نحو الأرض في هذا الوقت، فإن هذا موضع جدل. ولكن من الحقائق المسلم بها أن تكرار حدوث الوهج يرتبط إلى حد بعيد بدورة نشاط الكلف الشمسي.

وتجرى الآن أبحاث عديدة في معهد الفيزياء الأرضية التابع لجامعة «ألاسكا» في مدينة «كوليج» بجوار «فيربانكس» حول حدوث الوهج في سماء ألاسكا. وفي الفترة ١٩٥٣ – ١٩٥٤ (وهي فترة كان فيها النشاط الشمسي في نهايته الصغرى تقريباً) ظهر من حين لآخر بعض الوهج فوق مدينة «كوليج»، رغم أن المجال المغناطيسي كان هادئاً تقريباً. أما في الأيام التي تهب فيها العواصف المغنطيسية فإن نشاط الوهج يستمر فوق المدينة لفترة تستغرق ٥٢٪ من الزمن الكلي للمراقبة.

إن مشاهدة الوهج في أوج نشاطه أمر مثير حتى بالنسبة للراصد الذي ألف هذه الظواهر. فحركاته وتغير أشكاله وألوانه تتخذ أسلوباً متنوعاً إلى حد يعجز عنه الوصف. وقد يسهل متابعة سيرك ذي ثلاث حلقات عن متابعة الوهج الذي ينتشر فوق روءسنا ويملأ السماء من حولنا.

وبينما لا تمثل الأشعة والشرائط الضوئية المتحركة في هذه المرحلة إلا مشهداً مثيراً بالنسبة للرجل العادي، فإن رجل العلم يجد في الأشكال الهادئة للوهج أهمية كبرى. فالسماء تغطيها شرائط ضوئية هائلة تمثل فيضاً من البروتونات أحالها المجال المغناطيسي للأرض إلى حزم رفيعة إلى حد كبير. فشريط الوهج لا يتجاوز سمكه في بعض الأحيان ٨٠٠ قدم. ومع ذلك فإن هذا الشريط يمتد على مدى البصر من الشرق إلى الغرب عبر الأفق إلى ١٢٠٠ ميل أو أكثر، ولا يعلم أحد إلى أي مدى تمتد هذه

الأقواس. وأحد برامج السنة الجيوفيزيائية الدولية سيخصص لمعرفة المدى الذي تمتد إليه شرائط الوهج حول الكرة الأرضية.

وفي مدينة «كوليج»، التي تقع قرب منتصف أكثر الأحزمة نشاطاً في نصف الكرة الشمالي، لا نرى أنواع الوهج العظيمة فحسب، بل نشاهد أيضاً معظم أنواع الوهج الأقل شأناً. وقد بذلت الجهود لرصد الوهج على مقياس كبير من محطات خمس منتشرة في أنحاء ألاسكا. وتقع هذه المحطات عند «كوليج»، و«نورث واي» على الطريق الرئيسي لألاسكا قرب الحدود الكندية، وفي «شيب ماونتن» شرقي «أنكوريج»، وفي «نوم» بشبه جزيرة «سيوارد». وأخيراً في «بوينت بارو» التي تقع في الطرف الشمالي لألاسكا.

ولشرح تطورات ظهور الوهج كما نشاهد من ألاسكا نأخذ على سبيل المثال ما انتهى إليه رصد الوهج في ٢٦ – ٢٧ مارس عام ١٩٥٤. أخذت المحطات الخمس في التسجيل طوال الليل. ففي الساعة ٨,٤٠ مساء ظهر شريط من الضوء المتجانس عبر الجزء الشمالي الشرقي من المنطقة عند خط العرض ٧٠º تقريبًا. وفي الساعة ٩ مساء كان الشريط قد تقدم تدريجياً نحو الجنوب حتى خط العرض ٦٨º. وبعد مضي نصف ساعة أخرى أصبح عدد الأقواس المضيئة أربعة بين خطي العرض ٦٧º، ٧٠º ثم ازداد عدد هذه الأقواس وكان الشريط الضوئي الذي يتقدمها وقتئذ إلى الجنوب متجانساً، في حين تخللت الأقواس الأخرى أشعة مستعرضة. وفي الساعة ١٠,١٥ مساء كان عدد الأقوى المشاهدة ثمانية،

يقع أقصاها نحو الجنوب عند خط العرض ٦٢½º. وبعد ذلك بفترة وجيزة ظهر ما نسميه «بالانقسام الكاذب» – وهو تشتت أحد الأقواس الشمالية وانبعاث شعلات وقتية من الضوء مصحوبة بنشاط عنيف، ولكن سرعان ما عادت هذه التشكيلات إلى وضعها الأصلي. وبعد منتصف الليل بقليل تشتتت مجموعة من الأقواس، واشتد لمعان القوس الجنوبي، وبدا كأنه يهتز على طول امتداده، وفي ثوان قليلة امتلأت سماء ألاسكا شمال خط العرض ٦٢º بالأشعة والشرائط والسطوح الضوئية. وكانت جميعاً تتحرك حركة عنيفة. وبعد بضع دقائق تشكلت إلى سطوح متذبذبة، وفي الساعة الواحدة صباحاً اختلطت جميع السطوح ببعضها البعض، وفي الساعة الثالثة صباحاً تحول الوهج إلى مجرد قناع متداخل ومحصور في المنطقة بين خطي عرض ٦٦º، 68º. ثم أخذ هذا القناع في الاضمحلال تدريجياً إلى أن وضح النهار.

وللأجهزة العديدة التي استخدمت في دراسة الوهج القطبي فائدة كبرى. وأحد هذه الأجهزة عبارة عن آلة لتصوير السماء أعدها «س. و. جارتلين» (C. W. Garthein) لتسجيل الوهج. استخدم «جارتلين» آلة تصوير سينمائية مقاس ١٦ مم تتجه إلى أسفل نحو مرآة محدبة كي تصور ما تعكسه هذه المرآة من صورة شاملة للسماء، وبذلك تمكن من مراقبة السماء بصفة مستمرة، ومن هذه الأجهزة أيضاً المطياف الذي يحلل ضوء الوهج ويدلنا على أنواع الذرات والجزيئات الموجودة في الجو. وكذلك درجة حرارتها ومقدار الطاقة التي تشعها، وبعض طرق إثارتها. غير أن سرعة تغير الوهج وخفوت ضوئه كان سبباً في صعوبة استخدام

المطياف. ولكن تطور أساليب البحث في النرويج وكندا والولايات المتحدة الأمريكية جعل من الممكن الحصول على أشكال طيفية جميلة للوهج، فشمل الجزء المرئي من الطيف وكذلك الجزء القريب من الأشعة فوق البنفسجية ودون الحمراء، وخلال دراسة «أ. ب.ماينل» (A. B. Meinel) وزملائه في مرصد «يركس» للأطياف في تجاربهم عن قذف الغازات الجوية عند منخفض، استدلوا على أن نشاط منخفض، استدلوا على أن نشاط الوهج يرجع إلى البروتونات في طور الوهج الشريطي وإلى الإلكترونات في طور تجزئة هذه الأشرطة. كما اكتشف «كينيت باولز» (Kenneth Bowles) في كوليج دليلاً على هذا الفارق الرئيسي للوهج وهو في شكب متجانس أو على هيئة أشعة. فبدراسة الإشارات اللاسلكية المنعكسة من الوهج اتضح وجود إزاحات في ترددها – ظاهرة «دوبلر». فعندما تنعكس الإشارات اللاسلكية من الأشرطة المتجانسة تكون الإزاحة في الناحية الدالة على أن حركة الجسيمات نحو الأرض. أما الإشارات المنعكسة على الوهج على هيئة أشعة فقد دلت على وجود إلكترونات صاعدة إلى أعلى.

يعتبر اللاسلكي والرادار من الأدوات المفيدة جدًا في دراسة الوهج. فجها ز الرادار لا يرى بالضبط ما تراه العين أو آلة التصوير، ولكنه يتميز بالقدرة على اكتشاف الوهج خلال السحاب أو في ضوء النهار. كما أن الفلك اللاسلكي ذو فائدة كذلك. وكما أن اضطرابات الهواء الجوي تجعل النجوم المرئية تتلألأ، كذلك فإن اضطرابات الوهج في الجو المشحون بالكهرباء تجعل النجوم التي تكشف عنها أجهزة الفلك اللاسلكية تتلألأ.

وبإجراء تجارب دقيقة يمكن تقدير حجوم وحركات الاضطرابات في منطقة الوهج. وبالإضافة إلى ذلك ظهر أن منطقة الوهج تمتص مقداراً ملموساً من ضوضاء الراديو القادمة من الفضاء الخارجي.وقد ظهرت محاولات عديدة لقياس مقدار الوهج أو شدته. ويستعمل المعهد الجيوفيزيائي في «كوليج» الآن «فوتومتر» كهرو – ضوئي لقياس إضاءة السماء أثناء انتشار الوهج. وتتم هذه القياسات في جزء صغير من الطيف المرئي حيث أمكن التعرف على ضوء الوهج، مثال ذلك خط الوهج الأخضر. وتدل هذه القياسات على أن الوهج يضاعف من إضاءة السماء في الليل بمقدار عشرة أمثال في المتوسط. وعندما تحدث زيادة هائلة في شدة الوهج تتضاعف إضاءة السماء مائة مرة.

ولدراسة الوهج في السنة الجيوفيزيائية عدة أهداف منها. عمل خرائط آنية لتوزيع انتشاره فوق الكرة الأرضية، وخاصة لتحديد حدوث الوهج في المناطق القطبية الشمالية والجنوبية في آن واحد. ومن بين الأهداف أيضاً دراسة علاقة الوهج بالنشاط الشمسي وبالعواصف المغناطيسية والظواهر الأرضية الأخرى. كذلك دراسة العمليات الفيزيائية التي تتبع الوهج وقياس حجم الوهج نفسه. وسيدرس بإمعان مدى تكرار الوهج بعمل إحصاء فوق مساحات صغيرة مختارة على سطح الأرض، ولتكن درجة مربعة مثلاً (أي ما يناهز مساحة مربع ضلعه ٦٩ ميلاً).

تباشر هذه الدراسات سلاسل من المحطات المزودة بمعدات التصوير التي سبق ذكرها ومحطات الرادار، ومراكز لقياس الطيف (ومن بينها معمل

مجهز في طائرة ومزود بمنظار لرصد سماء المنطقة)، وكذلك تلسكوبات لاسلكية ومراصد ومجموعات أخرى منوعة. وسوف يستعين الباحثون أيضًا بتقارير من المراقبين الهواة للوهج، وخاصة في المناطق التي تندر رؤية الوهج فيها. وعند احتمال ظهوره في المناطق المشار إليها ستوجه نداءات عامة. ويقع المركزان الأمريكيان لتحميع وربط كل الأرصاد في «ايتاكا» بنيويورك وفي «كوليج».

ويرتبط بدراسات الوهج ارتباطاً وثيقاً مشروع لدراسة ظاهرة سماوية هامة أخرى تسمى الوميض الجوي. فالسماء مليئة بوميض خافت ليلاً ونهاراً، هذا الوميض لا تراه العين، غير أننا ندرك وجوده بالآلات الحساسة. وعدم رؤيته يرجع أولاً إلى أنه خافت إلى حد كبير، وثانياً لأن أكثر إشعاعاته شدة يقع خارج الطيف المنظور. ولو كانت أعيننا حساسة للأشعة دون الحمراء لرأتْ الوميض في سماء الليل أشبه ما يكون بضوء الشفق.

وكما هي الحال بالنسبة للوهج فإن سبب تكون الوميض هو إثارة الذرات والجزيئات في الغلاف الجوي. وينشأْ الوميض في الظاهر عند نفس الارتفاع الذي يتولد عنده الوهج. ويبدو أن وميض النهار ووميض الليل يتولدان نتيجة عمليات مختلفة. ويصعب على وجه الخصوص تفسير وميض الليل. ويكاد يكون من المؤكد أن المصدر الرئيسي لطاقة وميض الليل هو الشمس. ولكن من الصعب أن نتصور نوع العملية التي تحول جانباً من طاقة الشمس التي تغمر الأرض باستمرار إلى وميض الليل. ولو عرفنا هذه

العملية لزودنا ذلك بمعلومات ذات أهمية كبرى عن الطبقات العليا للغلاف الجوي.

يبين الجدول اللمعان النسبي لكل من الظواهر الجوية المختلفة. وإشعاعات الوهج الليلي بالجزء المنظور من الطيف تكون عادة خافتة فلا يمكن رؤيتها.

اكتشف الوميض الجوي لأول مرة منذ عشرات السنين وجد الفلكيون دواماً أن طيف السماء إشعاعًا أخضر، لا يمكن أن يكون مصدره النجوم أو الكواكب. ونظراً إلى أن هذا الإشعاع الأخضر صادر بالتأكيد من الغلاف الجوي، ولأنه هو نفس الخط الأخضر الذي يشاهد في الوهج فقد أطلق على هذا الوميض اسم «الوهج الدائم» ثم أعيد تسميته فيما بعد باسم الوميض الجوي.

وقد تم التحقق من وجود أربعة أطوال موجبة محددة في الوميض الجوي: أحدها هو الخط الأخضر الذي طول موجته ٥٥٧٧ انجستروم، وينبعث من ذرات الأكسجين المثارة وثانيها هو الخط الأحمر الذي طول موجته ٦٣٠٠ أنجستروم وينبعث أيضاً من ذرات الأكسجين في درجة أخرى من الإثارة. أما ثالثها فهو الأصفر الذي طول موجته ٥٨٩٣ أنجستروم ويولده الصوديوم، والرابع إشعاع قوي في المنطقة دون الحمراء عند الطول ١٠,٠٠٠ أنجستروم، وينبعث من ذرات الهيدروكسيل (يدأ). ولو كان هذا الإشعاع الأخير مرئياً لكان في شدة إضاءة الوهج.

والإشعاعات التي في الجو المرئي من الطيف تقل شدتها كثيراً عن الحد الأدنى الذي تحس به العين، ولو أنه في بعض الأحيان يشتد الوميض إلى درجة تستطيع معها العين المعتادة على الرؤية في الظلام أن تحدد بصعوبة بعض التفاصيل في ضوء الوميض الليلي.

وقد ظفر الوميض الجوي بجانب كبير من الدراسة المركزة خلال السنوات العشر المنصرمة. وفي مقدورنا الآن أن نناقش خصائصه بشيء من التفصيل. إلا أنه لا يتيسر بطبيعة الحال إدراك وجوده. وقد سجلت خطوطه الطيفية باستعمال أجهزة ممتازة لتحليل الطيف، عرضت للوميض لمدة طويلة (في كثير من الأحيان عدة ليال). وباستعمال فوتومترات كهروضوئية ومكثفات تمرر الألوان النقية جداً وتستبعد الإشعاعات المحيطة القادمة من الفراغ الخارجي، أمكن دراسة تغيير شدة الوميض الجوي بتغير الزمن وكذلك بتغير مكانه في السماء.

وقد بينت هذه الدراسات أن الوميض الجوي أضعف ما يكون عند السمت، أي أعلى الرأس، وتزداد شدتهكلما انحدرنا في السماء نحو الأفق إلى أن تصل شدة الوميض إلى ذروتها عند ارتفاع ١٠ درجات فوق الأفق. وهذا أمر متوقع إذا لاحظنا أن الكاميرا تنظر خلال طبقات متزايدة السمك من الغلاف الجوي كلما انحدرنا من السمت إلى الأفق. وازدياد شدة الوميض تبعاً لذلك على أن الوميض ينشأ في الغلاف الجوي. ويمكن تقدير ارتفاع الوميض عن سطح الأرض من ملاحظة ازدياد شدته نحو

الأفق. والدلائل المتوافرة بين أيدينا تدل على أن هذا الارتفاع يتراوح بين ٦٠ ميلاً، ١٢٠ ميلاً.

هذا ويميل اللون الأخضر في الوميض إلى أن تزداد شدته في ساعات المساء وتقل شدته بعد منتصف الليل. بينما تقل شدة اللون الأحمر الذي يصدر بدوره عن ذرات الأكسجين في ساعات المساء وتزداد شدته قليلًا قبيل الفجر. وهذه الحقيقة تبدو غريبة بالنسبة لما نعرفه عن ذرة الأكسجين. فعندما ينبعث من ذرة الأكسجين الإشعاع الأخضر (٥٥٧٧) تظل الذرة في حالة إثارة ينبعث بعدها الإشعاع (٦٣٠٠). وتستمر في حالتها هذه مدة ١١٠ ثوان تهبط بعدها إلى المستوى الأدنى التالي من الطاقة وعندئذ تشع الأحمر (٦٣٠٠). وواضح أنه لابد من مؤثر فيزيائي في أعالي الجو يتدخل في الفترة ١١٠ ثوان فيقلل من طاقة ذرات الأكسجين قبل أن تشع الأحمر(٦٣٠٠)، وربما قلت طاقة الذرات بسبب تصادمها مع ذرات أخرى. ويشبه هذا الوضع كرة البيسبول عندما يقذف بها إلى سطح مدرج النظارة. تتدحرج الكرة من فوق السطح وتهبط إلى النظارة ومن ثم تنحدر بين المقاعد في الملعب، ولكن كل من يلم بلعبة البيسبول يعلم أن فرصة عودة الكرة إلى الملعب منعدمة عملياً، إذ أنها تصطدم بعقبات مادية عديدة أو أجسام بشرية ثم تستقر عادة في جيب طفل.

وتطلق ذرات الصوديوم الطاقة التي تنتج اللون الأصفر المميز للصوديوم. وتنطلق تلك الطاقة بسهولة إلى درجة أن هذا الإشعاع يمكن

الاستدلال عليه مهما كانت كمية الصوديوم الموجودة ضئيلة. وتبعًا لهذا فإنه بالرغم من أن الغلاف الجوي العلوي لا يحتوي إلا على ذرة واحدة من الصوديوم بين كل مليون مليون ذرة من ذراته فإن الإشعاع الأصفر المميز للصوديوم والموجود في الوميض يكون عادة بنفس شدة اللون الأخضر والأحمر اللذين يطلقها الأكسجين. ولعل أغرب مظهر من مظاهر إشعاع الصوديوم في الوميض الجوي هو تفاوته من فصل لآخر. ففي أواخر الخريف يكون إشعاع الصوديوم في خطوط العرض الشمالية أشد لمعاناً من إشعاع الأكسجين. ولكنه في منتصف الصيف يكون من الضعف بحيث لا يمكن إدراك وجوده في كثير من الأحيان. وقد اقترح بعضهم وجود سحابة كبيرة من الصوديوم في أعالي الجو تقضي الشتاء في الخطوط المتوسطة والصيف في المناطق الاستوائية.

وقد اكتشف إشعاع (يدا) في الوميض الجوي (وجد أولاً في المنطقة دون الحمراء وأخيراً وجد بصورة أقل وضوحاً في الجزء المرئي من الطيف)، وكان اكتشافه دافعاً إلى دراسة مصدر إشعاع الوميض. والمعتقد أن إشعاع (يدا) ينشأ من تصادم ذرات الأيدروجين بجزيئات الأوزون التي تنتج (١ ٢) وحالة مثارة من (يدا) وأحد الافتراضات الوجيهة كذلك وجود عدد من التفاعلات الكيميائية التي يمكن أن تنشأ عنها ظاهرة الوميض الجوي. وهناك فرض فحواه أن الوميض الليلي هو تفريغ كهربائي يجري على نطاق واسع في أعالي الجو ويشبه التفريغ الذي نشاهده عادة وعلى نطاق صغير قرب سطح في أثناء العواصف الكهربائية.

والوميض الليلي هو جانب من الوميض الجوي، إذ يوجد أيضاً وميض الشفق وهو أشد من وميض الليل مائة مرة تقريباً، ولكن تتعذر على العين رؤيته لأن السماء تكون أشد إضاءة. وإذا كان الوميض الليلي لو يستدل عليه بعد فإن وميض الشفق ليس كذلك. فهو أشد ما يمكن عندما تكون الشمس منخفضة عن الأفق بمقدار ٨ أو ١٠ درجات، وعندئذ نجد أن أكثر أشعة الشمس انخفاضًا تعبر الغلاف الجوي عند ارتفاع ٦٠ ميلاً فوق الراصد وعندئذ يلمع الخط الأحمر (٦٣٠٠) الصادر من الأكسجين وكذلك الأصفر الصادر من الصوديوم، أما الأخضر (٥٥٧٧) الصادر من الأكسجين فتضعف شدته. ولا يمكن الشك في أن وميض الشفق إنما ينشأ عن أشعة الشمس التي ترفع ذرات أعالي الجو إلى مستويات الطاقة التي تكفي لإنتاج الإشعاع المشاهد.

وحيث أن الشمس تنتج مباشرة وميض الشفق فلاشك أنها تنتج أيضاً الوميض النهاري. وطبيعي أنه لا يمكن الاستدلال على وجود الوميض النهاري بسبب شدة إضاءة السماء، ولكن من الممكن تسجيله بوساطة أجهزة علمية يحملها صاروخ إلى أعالي الجو حيث تكون السماء سوداء لوجود عدد قليل نسبياً من الجسيمات التي تستطيع تشتيت ضوء الشمس. وقد أطلق عدد قليل من الصواريخ ولكن لم يتحقق بعد تماماً وجود إشعاعات الوميض الجوي.

وقد رسمت خطة لعمل أرصاد واسعة النطاق في أثناء السنة الجيوفيزيائية الدولية للوميض الجوي، وقد تم تنسيق برامج هذه الأرصاد مع دراسات الوهج القطبي، وقد أعدت لذلك سلاسل من محطات المراقبة.

ظاهرة الصفير

ل. ر. أ. ستوري

أين ينتهي الغلاف الجوي وأين يبدأ الفراغ؟ وممّ يتركب الهواء العلوي؟ وما هي درجة حرارته، وما هي كثافته، وما هي صفاته الفيزيائية؟.

لقد تم الكشف عن طبقات الغلاف الجوي تماماً حتى ارتفاع ٢٠٠ ميل بواسطة موجات اللاسلكي كما أوضح «جوتببه» في فصل سابق. ولكن ما وراء ذلك من الغلاف الجوي لا يزال مجهولاً إلى حد كبير. فالطبقة الجوية المتأينة (الأيونوسفير) يقل سمكها إلى درجة تصبح عندها غير قادرة على عكس أمواج الراديو إلينا. ولا يوجد لدينا جهاز يستطيع التعرف على كنه المناطق الخارجية. ولكن اتضح حديثاً أن الطبيعة نفسها دائبة على سبرغون الغلاف الجوي الخارجي بشكل نستطيع معه أن تتبعه، ومن هنا تبدأ قصة هذا الفصل من الكتاب.

تبدأ قصة ظاهرة الصفير برصد عرضي في ميدان القتال في أثناء الحرب العالمية الأولى حينما حاول العالم الفيزيائي «هينريش باركهاوزن» (Heinrch Barkhausen) (مكتشف تأثير باركهاوزن المغنطيسي) خلف الخطوط الأمامية أن يسترق السمع للمحادثات التليفونية بين الحلفاء في الميدان بجهاز فذ بسيط: ثبت «باركهاوزن» قضيبين معدنيين في الأرض وتفصل بينهما بضع مئات من الياردات وإذا بتيارات كهربائية

ضعيفة متسربة إلى الأرض من الأسلاك التليفونية للحلفاء تسري بين هذين القضيبين، فقام بنقل هذه التيارات إلى مكبر حساس، وبذلك تمكن «باركهاوزن» من الاستماع إلى المحادثات التليفونية بواسطة سماعات الرأس. وفي أثناء استراقه السمع صادفه من آن لآخر صفير غريب كان يطغى تمامًا على المحادثات التليفونية العسكرية. وقد اهتم بهذه الظاهرة إلى درجة أنه ذكرها في إحدى نشراته: «سمعت درجة ملحوظة من الصفير في التليفون، وقد عزى هذا الصفير إلى صوت قذف القنابل في الجبهة».

كان أول رد فعل عند «باركهاوزن» هو أن هذا الصفير قد صدر عن جهازه. ولكن عندما فشلت كل المحاولات لإقصائه ثبت في روعه أن مصدر هذا الصفير هو الغلاف الجوي، وكان محقاً في ذلك، ثم انقضت بعد ذلك سنوات عديدة قبل أن تحظى هذه الظاهرة بالمزيد من الاهتمام، أو أن يدرك أحد مدلولها.

إن إشارات الراديو الجوية التي تأتي في أثناء العواصف القريبة على شكل ضوضاء هي أمر مألوف؛ ولكن الصفير الذي سمعه «باركهاوزن» لم يكنْ في نطاق الأمواج التي تستعمل في الإرسال العادي. فقد كانت عبارة عن إشارات ذات تردد منخفض طويلة الموجة دون أدنى تردد إذاعي. ويعلم مهندسو اللاسلكي الآن أن دون هذا الطرف من طيف الإذاعة اللاسلكي تسمع أنواع من الضوضاء الغريبة المنوعة، وكلمة يسمع هنا تؤدي المعنى، لأن تردد هذه الأمواج هي من الانخفاض بحيث أنها تقع في متناول السمع المباشر أي في مدى السمع البشري. ولذلك نحتاج فقط إلى

أبسط الأجهزة لتتبعها: هوائي لالتقاط الذبذبات الكهربائية الجوية، ومكبر صوتي كالذي يستعمل في الجراموفون لتحويل الذبذبات رأساً إلى صوت.

وماذا نسمع عندما يعمل هذا المكبر؟ نسمع في الغالب نقيراً كالذي يظهر في موجات الإذاعة. ولكن من حين لآخر يتاح لنا أن نسمع ضوضاء موسيقية نسبياً نتفنن في تسميتها بأسماء ترتبط بما تحاكيه هذه الأصوات. فيوجد صوت يشبه «صلصلة النقود» وهو نغمات قصيرة معدنية تحدث من ارتداد الأمواج بين الأرض والأيونوسفير. كما يوجد «كورس الفجر»، وهي ضوضاء لايمكن تفسيرها وتحدث في أثناء العواصف المغناطيسية ويوجد كذلك «صفير باركهاوزن».

تهبط درجة نغمة الصفير مبتدئة من النهاية العظمى لمدى السمع، ويكون هبوطها سريعاً في أول الأمر، ثم تهبط ببطء عند الذبذبات المنخفضة. ويتضاعف طول موجة النغمة عدة مرات في مدى ثانية أو اثنتين (كلما قلت الذبذبة زاد طول الموجة).

وقد درس كل «أ. ت. بيرتون» (E. T. Burton)، «أ. م. بوردمان» (E. N. Boardman) في معامل شركة «بل» للتليفون، وكذلك «ت. ل. إكرسلي» (T. L. Eckersley) في شركة ماركوني للتلغراف اللاسلكي في انجلترا، ظاهرة الصفير إلى حد ما في السنوات ما بين ١٩٢٠، ١٩٣٠. وقد لاحظ هؤلاء الباحثون أن الصفير يتبع غالباً (وليس دائماً) «نقيرًا» جويًا حادًا بمدة ثانية أو ما يقرب منها. وكان مصدر

النقير نفسه وقتذاك أمراً يكتنفه الشك، ولكنه كان على أي حال طريقاً حافزاً إلى الدراسة. وكان يبدو أن الصفير إن هو إلا صدى للنقير منعكس من الأيونوسفير. ومن ثم السؤال: كيف يمكن أن يتحول النقير إلى صفير؟.

وقد توصل «باركهاوزن» و«إكرسلي»، كل على انفراد، إلى تفسير أثبتت التجارب صحته فيما بعد. فقد كان من الواضح ان النقير يتركب من عدد من الترددات المختلفة، حيث أن النقير الواحد يمكن سماعه على أي موجة من موجات الإرسال، وبالتأكيد في نطاق المواج الصوتية كذلك. وكان من المعلوم أيضاً أن أمواج الراديو ذات الترددات المختلفة تسير بسرعات مختلفة في الأيونوسفير. ولنفترض أنه في أثناء اختراق النقير لطبقة الأيونوسفير، تحللت مركباته ذات الترددات المختلفة، فالترددات العالية تسير أسرع بينما تتأخر الترددات المنخفضة. فعندما يسير النقير مسافة كبيرة تتباعد مركباته وتصل إلى المستمع تباعًا بحسب ترددها وسرعاتها الأمر الذي يشكل صفيراً تهبط درجته بانتظام (انظر الشكل ١٦).

وقد قام ايكرسلي بصياغة هذا العرض في صورة معادلات وأرقام. وأدخل في حسابه أن نوعاً معيناً من إشارات الراديو يمر في الأيونوسفير دون أن ينعكس وأن سرعة هذه الإشارات لابد أن تهبط ٢٠/١ أو أقل من سرعتها الأصلية، كما أن سرعتها لابد أن تتوقف على عدة عوامل: ترددها، واتجاه سيرها بالنسبة للمجال المغناطيسي للأرض، وشدة هذه المجال، وكثافة الإلكترونات في المناطق التي تعبرها.

يسمع التفريغ الكهربي الجوي (بأسفل اليسار) في محطة الاستقبال (بأسفل اليمين) على شكل نقير (موجة مستطيلة كالمبينة بواسطة الرسم من جهة اليسار) مكونة من أطوال موجات مختلفة وعديدة. تنتقل الموجات القصيرة في الأيونوسفير (الجزء المظلل) بسرعة أكبر من سرعة انتقال الموجات الطويلة (بأعلى اليمين)، وينشأ عن تلك صفير (وسط الجزء الأيمن) يسمع أخيراً في نفس محطة الاستقبال.

وإذا أخذنا في الاعتبار عامل التردد فقط فإن سرعات الموجات من هذا النوع خلال الأيونوسفير يجب أن تتغير بنسبة الجذر التربيعي للتردد. فمثلاً: موجة ترددها أربعة أمثال تردد موجة أخرى يجب أن تسير بسرعة ضعف سرعة الأخيرة، مع بقاء العوامل الأخرى ثابتة. وعلى ذلك، ففي حالة النقير الذي يعبر مساراً معيناً في الأيونوسفير فإن سرعات مركبات تردده يجب أن تتوفر بينها علاقة الجذر التربيعي البسيطة. وهذا يعني أن الزمن اللازم كي تقطع هذه الترددات المختلفة هذا المسار يجب أن يتناسب عكسياً مع الجذر التربيعي لهذه الترددات.

وللتأكد من صحة هذه التنبؤات يلزمنا فقط أن تستخدم جهاز تحليل الترددات لنفرق بين تردد المركبات المختلفة للنقير، وأن نتأكد من أن زمن وصول عدد من هذه الترددات عقب النقير يخضع للنسبة المفترضة. وقد وجد «إيكرسلي» فعلاً أنها تخضع تماماً لها.

والسؤال الهام التالي هو: ما طول المسار الذي يقطعه الصفير؟ والجواب بالطبع يتوقف على مقدار تشتت الترددات: (أي المدى الذي تستغرقه نغمة الصفير). ولكن من المستحيل أن نحصل على تقدير دقيق للمسافة المقطوعة من هذه الناحية، لأن التشتت يعتمد أيضاً على متوسط كثافة الإلكترونات، وعلى شدة المجال المغنطيسي في المسار، وهذه كميات غير معلومة، وعلى العموم نستطيع أن نحسب بصورة مبدئية أقل مسافة يقطعها الصفير: فباستبعاد أثر المجال المغناطيسي، وبفرض أقصى كثافة ممكنة للإلكترونات في مسار الصفير (أعلى كثافة لطبقات الأيونوسفير) يمكننا أن نحسب طول مسار الصفير الذي يبين مقداراً نموذجياً من التشتت. والجواب المذهل هو ١٥٠٠٠ ميل، والظاهر أن الصفير يمتد إلى ما وراء ما كان يعتقد أنه حدود الغلاف الجوي للأرض.

وعندما بدأت في دراسة الصفير بمعمل «كافندش» بجامعة كمبردج عام ١٩٥٠ كان يبدو أن هناك مسألتين هامتين: أولاً، ما هو مصدر النقير؟ وثانياً، أين يمتد المسار وكيف تنعكس الموجات عند طرف هذا المسار؟

كان واضحاً في ذلك الوقت أن هناك احتمالاً كبيراً أن يكون مصدر النقير هو البرق. ولدراسته استعنا بجهود مكتب أرصاد وزارة الطيران البريطانية. ولهذا المكتب منظمة تستطيع تحديد مكان العواصف البرقية بدراسة الأحوال الجوية. وله أربع محطات متفرقة في أنحاء المملكة المتحدة لتحديد مصدر النقير الجوي. وقد أعددنا ترتيباً بحيث نتلقى إشارة تليفونية

في اللحظة التي يحدد فيها مضع النقير. وسجلنا هذه الإشارات ولاحظنا ما إذا كان يتلوها صفير. ورسمنا خريطة تحدد مواضع النقير، وفيما بعد تمكنا من ربط العلاقة بين شدة ارتفاع صوت كل صفير وبين المسافة بين مصدر النقير وجهاز الاستقبال.

وقد أوضحت هذه الأرصاد وتحليل أشكال الموجات، بما لا يقبل الشك، أن مصدر النقير هو لفحات البرق. وقد التقطنا صفيراً حاداً صادراً من عاصفة برقية تبعد عنا بمسافة ٦٠٠ ميل. ومن مراكز أرصاد امتدت بعيداً لاحظنا أن شدة الصفير أخذت تضعف بانتظام إلى أن انعدم استقبالنا له على بعد يزيد على ١٢٠٠ ميل. وبمعنى آخر لم نتمكن من التقاط صدى للنقير الذي قد ينشأ على بعد يزيد على ١٢٠٠ ميل.

كان هذا أمراً غريباً. فقد كان المرء يتوقع أن تنتشر هذه الموجات إلى مسافات أكبر. ومع ذلك فهاهنا أمواج سارت مسافة لا تقل عن ١٥٠٠٠ ميل. وبعد أن تقطع هذه المسافة الكبيرة تعود على شكل صدى يمكن استقباله في مساحة لا يزيد نصف قطرها على ١٢٠٠ ميل. ما هي العملية التي تحدث في الغلاف الجوي فتجمع هذه الأمواج على تلك الكيفية؟

لنحاول أن تتبع رحلة الموجة. عندما يحدث البرق تتولد أمواج لاسلكية تنتشر في كل جهة، ويذهب بعضها إلى أعلى نحو الأيونوسفير. وعندما تعبر هذه الأمواج اللاسلكية الحاجز بين الهواء العادي والمنطقة

المتأينة تنحنى كما ينكسر شعاع الضوء عندما يعبر الحاجز بين الهواء ووسط آخر. ومهما كانت زاوية سقوط الأمواج على الأيونوسفير فإن كل هذه الأمواج تنحني نحو العمود الرأسي. وكما لاحظنا فإن للأيونوسفير قدرة ملوحظة على كسر الأمواج (تثبيطها) إلى درجة أن كل الأشعة القادمة من كل الزوايا تتركز في حزمة ضيقة رأسية.

وفي أثناء الصعود في الأيونوسفير لا تستمر هذه الحزمة من الطاقة في الاتجاه الرأسي، وإنما تتبع خطوط المجال المغناطيسي للأرض لأنه المسار الذي تسير فيه الأمواج بسرعة أكبر. ويمتد النقير في مساره ويتحول إلى صفير.

وإذا كان صحيحاً أن الصفير يتبع خطاً من خطوط القوى المغناطيسية للأرض فإننا نعلم بعض الشيء عن نهاية مساره فمن سطح الأرض في انجلترا يمتد خط القوة المغناطيسي نحو الجنوب حول الكرة الأرضية، فيعبر خط الاستواء على ارتفاع ٧٠٠٠ ميل، ثم يهبط إلى الأرض ثانية في نصف الكرة الجنوبي، فالصفير الذي يتبع هذا المسار قد ينعكس على الأرض ويعود في نفس المسار إلى المنطقة التي صدر منها في انجلترا.

نعود بهذه الفكرة إلى سجلاتنا ومراكز أرصادنا. وفي ضوء ما لدينا من البيانات يمكننا أن نحصل على يؤيد هذا التعليل. فنجد أولاً أن من الحقائق المحيرة أن الصفير في بعض الأحيان يسمع دون أن يسبقه نقير.

ونستطيع الآن أن ندرك أن هذا الصفير يأتينا مباشرة من نصف الكرة الجنوبي، ليس نتيجة لصدى، وإنما رحلة مفردة لإشارة عن برق حدث في النصف الجنوبي، أما النقير نفسه فإنه لا يسمع لأنه يمتص في أثناء رحيله في المناطق السفلى من الغلاف الجوي قبل أن يصل إلينا وإذا كان الصفير قد قطع رحلة مفردة في الأيونوسفير فإن امتداده يكون مساوياً نصف امتداد الصفير الذي يسبقه نقير (الذي يقطع الرحلة ذهاباً وإياباً)، وقد أيدت القياسات هذا التنبؤ.

ثانياً: لوحظ منذ البداية تقريبًا أن النقير المفرد في بعض الأحيان لا يتولد عنه صفير واحد فحسب، بل سلسلة من الصفيريضعف كل منها ويطول امتداده بالنسبة لسابقه، وتتابع بينها فترات زمنية متساوية وقصيرة، ومن الواضح أنها رجع لنفس الصدى، يرتد ذهاباً وإياباً بين نصفي الكرة الأرضية، مثل كرة التنس. تلك حقيقة يؤيدها ما نلاحظه من أن مدى الصفير الذي يتوالى يتناسب مع عدد الرحلات التي قطعها كل منها. فعندما يعقب الصفير نقير كانت نسبة التشتت فيما بينها ٢: ٤: ٦: ٨ وعندما لا تسمع نقيراً (دلالة على أن مصدر الإشارة هو النصف الآخر من الكرة الأرضية) كانت النسب ١: ٣: ٥: ٧.

وفي تجربة مباشرة أجريت في الصيف الماضي، استقبل الصفير في أثناء ارتداده ذهاباً وإياباً بوساطة راصدين وحدا زمن تسجيلهما، ويقع كل منهما عند أحد طرفي خط قوة مغناطيسي (أحدهما في جزر «اليوشن»،

والثاني في «نيوزيلاند»)، وفي كل رحلة متتالية وجد أن الصفير قد امتد بالمقدار الذي كان متوقعاً.

أما المفاجأة الكبرى فهو ما يحدثنا به الصفير عن ارتفاع الغلاف الجوي الذي لابد أن يصل إلى ٧٠٠٠ ميل على الأقل، أي أكبر بعدة مرات مما كان في اعتقادنا. فقد كان المفروض أن الغلاف الجوي الذي لابد أن يصل إلى ٧٠٠٠ ميل على الأقل، من تشتت الصفير أنه عند ارتفاع ٧٠٠٠ ميل تصل الكثافة إلى ٤٠٠ إلكترون في كل سنتيمتر مكعب.

وهذا قد يعني عدة أمور. إذا افترضنا أن هذه الإلكترونات تأتي من تأين الغازات المعروفة في غلافنا الجوي (أكسجين وأزوت) فإنه لكي يتم هذا التأين يجب أن تكون درجة حرارة الغلاف الجوي الخارجي ٧٠٠٠º وهو رقم كبير لدرجة لا يمكن تصديقها. وقد افترض «ج. و. دنجي» (J. W. Dungey) بجامعة بنسلفانيا بدلا من ذلك أن هذه الإلكترونات ربما أتت من أماكن خارج الغلاف الجوي، وأن الأرض في أثناء سيرها في الفراغ تلتقط ذرات أيدروجين متأينة بها بوساطة المجال المغنطيسي. وتدل بعض التقديرات الحديثة على أن الفضاء المحيط بمدار الأرض يحتوي على ٦٠٠ ذرة أيدروجين في كل سنتيمتر مكعب وبهذا تبدو نظرية «دنجي» معقولة، إلا أن الأمر لم يحسم بعد.

والشيء الوحيد المؤكد هو أن الصفير لا يزال يدخر لنا الكثير من المعلومات. وفي السنة الجيوفيزيائية القادمة سوف يستمع المراقبون في جميع أنحاء العالم إلى هذه الرسالات الغريبة القادمة من الفضاء الخارجي.

حافة الفضاء .. الأقمار الصناعية

منذ بدء الخليقة والإنسان يتطلع إلى السماء فيبهره تلألؤ النجوم والكواكب فيها ويسحره جمالها، فاتخذ منها آلهة واسترشد بها في رحلاته البحرية والبرية واستمد منها العون في تنظيم مواسم زراعته واحتفالاته. وتقدمت المعرفة وتغيرت نظرته إلى تلك الأجرام السماوية فشغف بدراسة حركاتها وعلاقاتها بعضها ببعض، وتعلم منها الكثير. وكانت المعلومات التي حصل عليها الإنسان من تأمله في السماء وما تحويه من أجرام سماوية هي الأسس التي بنيت عليها العلوم الحديثة، فمنها وضعت أسس الفلك والميكانيكا وقياس الزمن.

وكان طبيعي، والأمر كذلك، أن يراود الإنسان حلم الانطلاق إلى تلك العوالم والتحرر من القيود التي تربطه بالأرض التي قدر له أن يكون أسيرها، حفزه إلى ذلك حبه للاستطلاع، فلم يثنه عنه القيود التي كبلته بها الطبيعة ليكون أسير الأرض، بل جعل يفكر في تحطيم تلك القيود، فاخترع الطائرة وارتفع بها في سلاسله بمثل هذه الوسيلة، فالطائرة يلزمها الهواء لكي يحملها وهي تطير ويريد الإنسان أن يجوب الفضاء منتقلاً من كوكب إلى آخر، وهذا الفضاء خلو من الهواء. إذ أن الغلاف الجوي للأرض ينتهي عند ارتفاع صغيرة جداً بالنسبة للمسافات الشاسعة التي تفصل الكواكب بعضها عن بعض عندئذ اتجه الإنسان بتفكيره إلى ناحية أخرى وهي تسيير مركبة فضاء لا تتطلب وسطاً مادياً (هواء) لتسبح فيه، فاخترع

الصواريخ التي كان لانطلاقها دوي هائل فتح عيون العالم على مبلغ قوة المحركات النفاثة والمحركات الصاروخية بنوع خاص.

والفكرة الأساسية في حركة الصواريخ هي رد الفعل، أي قانون نيوتن الثالث للحركة الذي ينص على «لكل فعل رد فعل مساو له في المقدار ومضاد في الاتجاه» وكذلك قانون بقاء كمية الحركة الذي ينص على «كمية تحرك أي مجموعة منعزلة ثابتة لا تتغير» فتستمد الصواريخ قوة اندفاعها عن طريق طرد غازات ساخنة في صورة تيار شديد الاندفاع، ويقابل القوة التي يندفع بها ذلك التيار رد فعل في الاتجاه المضاد يدفع الصاروخ بسرعة هائلة بحيث تكون كمية تحرك الصاروخ مساوية لكمية تحرك الغازات التي انبثقت منه ومضادة لها في الاتجاه، وذلك لكي تجعل القيمة النهائية لكمية تحرك المجموعة صفراً كما كانت قبل اندفاع الغاز منها. وعلى ذلك فتزداد سرعة الصاروخ كلما ازدادت السرعة التي يندفع بها التيار الغازي.

وتتوقف السرعة النهائية للصاروخ عندما يستهلك جميع وقوده على عاملين، أولهما السرعة التي يندفع بها التيار الغازي وثانيهما النسبة بين وزن الصاروخ عند الإقلاع ووزن ما يتبقى منه عندما ينفذ جميع الوقود، ويمكن كتابة العلاقة بين هذين العاملين على الصورة التالية:

$$ع_{ن} = ع_{أ}\ \text{لو هـ}\ ك_{أ} / ك_{ن}$$

أو $$ك_{أ}/ك_{ن} = \text{هـ}\ ع_{ن}/ع_{أ} = ٢,٧١٨\ ع_{ن}/ع_{أ}$$

حيث $ع_{ن}$ هي السرعة النهائية للصاروخ. $ع_{أ}$ سرعة اندفاع التيار الغازي، $ك_{أ}$ الكتلة الابتدائية للصاروخ، $ك_{ن}$ كتلة الصاروخ بعد نفاذ جميع الوقود، هـ أساس اللوغاريتم الطبيعي وتساوي ٢,٧١٨.

فلمضاعفة السرعة النهائية، إذن، يلزم أن تضاعف سرعة اندفاع التيار الغازي أو تربع نسبة الكتلة.

وزيادة سرعة اندفاع التيار الغازي من المسائل الكيميائية والحرارية والتعدينية التي يجري فيها البحث الآن وقد أمكن الوصول حتى الآن إلى سرعة تبلغ حوالي ٣ كيلو مترات في الثانية وهي قيمة تؤدي إلى سرعة نهائية للصاروخ قدرها ٣,٥ كيلو متر في الثانية إذا كانت كتلة الوقود تبلغ ٨٠% من الكتلة النهائية. هذا بإهمال تأثير الجاذبية الأرضية ومقاومة الهواء إلا أن هذه السرعة لا تكفي لأن يفلت الصاروخ من تأثير الجاذبية الأرضية، إذ لكي يفلت الصاروخ من هذا المجال يجب أن تبلغ سرعته ١١,٢ من الكيلومتر في الثانية.

وإذا بلغت سرعة الصاروخ خارج الغلاف الجوي الأرضي سرعة الإفلات انطلق في مسير مقطع مكافيء وأفلت من مجال الجاذبية الأرضية إلى مالا نهاية. أما إذا كتسبت سرعة تترواح بين ٧,٩، ١١,٢ من الكيلو متر في الثانية في الاتجاه غير العمودي على سطح الأرض وخارج الغلاف الجوي فإنه يتبع في مسيره قطعاً ناقصاً تكون الأرض في إحدى بؤرتيه، ويستمر في حركته في هذا المدار حول الأرض ما دام المدار بأجمعه خارج

الغلاف الجوي أما إذا بلغت سرعة الصاروخ ٧,٩ من الكيلو متر في الثانية دار حول الأرض في مدار دائري، وف كلتا الحالتين الأخيرتين تواصل القذيفة دورانها في فلكها حول الأرض، وتسمى في هذه الحالة «قمراً صناعياً».

ولكي يستمر القمر الصناعي في دورانه في فلكه حول الأرض يجب أن يكون المدار بأكمله خارج الغلاف الجوي الأرضي حيث تنعدم مقاومة الهواء أو تكاد، تلك المقاومة التي تعمل على الإنقاص من سرعته وسحبه نحو الأرض، وتتوقف الفترة الزمنية التي يمكن أن يقضيها القمر الصناعي في مداره داخل الغلاف الجوي الأرضي على ارتفاع المدار عن سطح الأرض وكثافة القمر الصناعي، فالأقمار الأكثف تبقى في مداراتها مدة أطول. ولقد بينت الحسابات أن الارتفاع اللازم لكي يستمر القمر الصناعي في دورانه حول الأرض إلى ما شاء الله يجب ألا يقل عن ٥٠٠ كيلو متر في حين أن القمر الصناعي الذي يدور على ارتفاع ٣٢٠ كيلو متراً فوق سطح الأرض يبقى في مداره خمسة عشر يوماً. أما إذا كان ارتفاع المدار ١٦٠ كيلو متراً بقي القمر الصناعي في مداره مدة لا تزيد عن ساعة.

ومن الممكن حساب السرعة اللازمة لحفظ القمر الصناعي في مداره بسهولة، إلا أنه بالإضافة إلى هذه السرعة، يجب أن يزود الصاروخ بالطاقة الكافية لحمله إلى ارتفاع المدار المطلوب ضد الجاذبية الأرضية، وتتراوح السرعة اللازمة للصواريخ بعيدة المدى بين ٥ و ١٠ كيلو متر في الثانية،

أما إذا أريد للصاروخ أن يدور حول القمر ويعود إلى الأرض فيلزم أن تكون سرعة الانطلاق من الأرض ٢٤ كيلو متراً في الثانية. ولا يمكن الوصول إلى هذه السرعة في مرحلة واحدة، لكن الطريقة المتبعة هي أن يبني الصاروخ مجموعة من الصواريخ تنطلق على مراحل فتزداد السرعة في كل مرحلة عن سابقتها وينتهي الأمر بجسم صغير نسبياً (هو الكبسولة التي تحمل الأجهزة أو الركاب) ينطلق بالسرعة المراد الوصول إليها. ومن الضروري في هذه الحالة توقيت المراحل المختلفة توقيتاً دقيقاً للغاية. أي ينبغي حساب اللحظات التي ينطلق فيها الوقود في المراحل المتتابعة من الصاروخ بدقة بالغة. فيجب أن تبدأ المرحلة في نفس اللحظة التي ينفذ فيها وقود المرحلة السابقة بالضبط، فإذا تقدم الانطلاق عن هذه اللحظة تأخر انفصال الجزء المراد انفصاله، إذ لا يكون وقود المرحلة السابقة قد تم نفاده، ويكون لا يزال فعالاً في تزويد الصاروخ بالعجلة في اتجاه الحركة، أما إذا تأخر الانطلاق التالي عن تلك اللحظة تسبب ذلك في تناقص السرعة وربما عمل توقف انطلاق تلك المرحلة نتيجة للقوى التي تنشأ وتعمل على سحب الوقود بعيداً عن متناول المضخات الساحبة له.

وأغلب الأقمار الصناعية التي أطلقت حتى الآن حملت على صواريخ ذات ثلاث مراحل ويمكن حساب النسبة بين كتلة القمر الصناعي والكتلة الكلية للصاروخ قبل انطلاقه من المعادلة السابقة. فإذا أردنا أن تكتسب المرحلة الأخيرة في صاروخ ذي ثلاث مراحل سرعة نهائية تساوي ثلاثة أضعاف سرعة إفلات الغاز (٣ كيلو مترات في الثانية في أحسن الأحوال) لزم أن تكون سرعة الانطلاق في المراحل الثلاثة مساوية

لسرعة إفلات الغاز وهذا يتطلب طبقاً للمعادلة السابق ذكرها أن تكون النسبة بين الكتلة الابتدائية للمجموعة وكتلة الجزء المتبقي بعد نفاد كمية الوقود في كل مرحلة مساوية ٢,٧٢ : ١ أي أنه إذا أريد أن يكون وزن المرحلة الأخيرة طناً واحداً فيجب أن تكون كتلة المجموعة في بداية المرحلة الثالثة ٢,٧٢ من الطن وبالتالي تكون كتلة المجموعة في بداية المرحلة الثانية ٧,٤ والكتلة الابتدائية في بداية المرحلة الأولى ١ و ٢٠ من الطن، هذا ويلاحظ أننا أهملنا في حسابنا تأثير الجاذبية الأرضية ومقاومة الهواء في إنقاص السرعة النهائية، وأخذ هذين العاملين في الاعتبار يزيد من الوزن الابتدائي للمجموعة. وتتراوح أوزان الأقمار الصناعية التي أطلقت منذ أكتوبر ١٩٥٧ (سبوتنك ١) حتى الآن بين ١,٥ كيلو جرام و ٣,٥٠٠ طن تقريباً.

ويتوقف زمن دورة القمر الصناعي حول الأرض على سرعته وبعده عنها ويمكن حسابه ببساطة في حالة المدار الدائري من المعادلة.

وإذا دار القمر الصناعي في مدار يبعد عن سطح الأرض بمسافة ٣٥٩٠٠ كيلو متر فإنه يتم دورته في نفس الزمن الذي تأخذه الأرض في إتمام دورتها حول محورها، وعلى ذلك فيبدو للراصد على الأرض أنه ثابت في مكانه كأنه مثبت في أعلى برج غير مرئي. ولعلنا ندرك التطبيقات المفيدة لهذا القمر «الساكن» لو تم النجاح في تنفيذه، فمما لا شك فيه أنه سوف يفيدنا في الأغراض الملاحية وقد يصلح كمحطة إرسال

تليفزيونية إذا أن مدى إرسال التليفزيون يتوقف كما نعلم على ارتفاع هوائي الإرسال.

هذا ويمكن أيضاً تسير مجموعة من هذه الأقمار وتجميعها في مدارها لتكون محطة فضاء كبيرة تصلح مراصد ومعامل أبحاث تتوفر فيها ظروف لا يمكن الوصول إليها عند سطح الأرض فهناك الحرارة الشديدة والبرودة المطلقة والفراغ التام – تلك الظروف التي طالما تاق الإنسان إلى توافرها لاستكمال دراساته للظواهر الطبيعية والبيولوجية.

ولجعل القمر الصناعي يدور في مدار ما يجب أن يزود بالسرعة العالية الكافية لجعله يدور في هذا المدار. الذي يجب أن يكون بأكمله خارج الغلاف الجوي إذا أريد أن يبقى القمر الصناعي في هذا المدار. ومن الممكن نظريًا أن يكون هذا المدار دائريًا والأرض في مركزه أو قطع ناقص والأرض في إحدى بؤرتيه، إلا أنه نظرًا لصعوبة التوجيه في الوقت الحاضر، فتوجه الأقمار الصناعية حاليًا لتدور في قطاعات ناقصة ولقد أطلقت الولايات المتحدة الأمريكية صاروخها «الصدى» في ١٣ أغسطس ١٩٦٠ في مدار قطع ناقص قريب من الدائرة ذي حضيض (أقرب نقطة على المدار من الأرض) ارتفاعه ١٥٢٠ كيلو مترًا وأوج (أبعد نقطة على المدار من الأرض) على ارتفاع ١٦٨٧ بدورة قدرها ١١٨,٣ من الدقيقة.

ولكي يوضع القمر الصناعي في مداره يطلق الصاروخ رأسياً ثم يعدل سيره في أثناء المرحلتين الأولى والثانية، وعندما يصل الصاروخ إلى أعلى

ارتفاع له فوق سطح الأرض تطلق المرحلة الثالثة ليدور في مداره القطع الناقص حول الأرض، وبالإضافة إلى الحركة الانتقالية في المدار يلف القمر الصناعي حول نفسه ليحافظ على استقراره ويقوم بعملية التوجيه مجموعة منالدورات تلقائياً، فعندما تحس بالخطأ في الاتجاه تقوم بتقويمه، وتةضع هذه المجموعة في المرحلة الثانية من الصاروخ.

إن الحلم الذي يراود الإنسان منذ زمن بعيد بدأ يتحقق، فلقد طلعت علينا الأنباء منذ شهور قليلة في أوائل عام ١٩٦١ بانطلاق الإنسان إلى الفضاء، فانطلق الطيار الروسي يوري جاجارين على متن مركبة الفضاء الروسية فوستك «الشرق» في النصف الأول من أبريل عام ١٩٦١ وارتفع إلى حوالي ٣٠٠ كيلو متر فوق سطح الأرض بسرعة تقرب من ٢٩٠٠٠ كيلو متر في الساعة واستغرقت رحلته ١٠٨ دقائق في الفضاء رجع بعدها سالماً إلى الأرض ولم يمض على تلك الرحلة أكثر من شهر حتى انطلق ألن شبرد الأمريكي في الرحلة البشرية الثانية للفضاء على متن «عطارد» الأمريكي فارتفع إلى ما يقرب من ١٨٤ كيلو متراً واستغرقت رحلته أربع عشرة دقيقة هبط بعدها سالمًا حيث تلقته السفن والطائرات في وسط المحيط. ولم يكن لجاجارين أو شبرد أي دور في تسيير المركبات التي امتطياها أو التحكم في حركتها. إنما كان يتحكم في حركة المركبتين العدد والآلات التي زودتا بها وكذلك عدد وآلالات المحطات الأرضية، كما اتبع في الصواريخ والأقمار العديدة التي أطلقتها كل من روسيا وأمريكا في الأعوام الثلاثة السابقة. لكن شبرد وجاجارين قدما للعالم بتطوعهما بالقيام برحلتيهما أعظم هدية إذ أثبتا أن السفر للكواكب أو

على الأقل جوب الفضاء أصبح حقيقة ولم يعد خيالاً يداعب أفكار القصصيين.

والجديد في الرحلتين البشريتين الأخيرتين أن الإنسان تمكن من إطلاق سفن الفضاء وإرجاعها ثانية سالمة بمن فيها طبقاً لخطة مرسومة. ولقد أجريت عدة تجارب على إرجاع صواريخ صماء إلى الأرض نذكر منها المستكشف الأمريكي رقم ١٤ الذي أطلق في أغسطس عام ١٩٦٠ وبقي يدور في الفضاء زهاء شهر في قطع ناقص ذي حضيض على ارتفاع ١٧٨ كيلو متراً وأوج يبلغ ارتفاعه ٨٠٨ كيلو مترات ثم أعيدت الكبسولة إلى البقعة التي حددت لعودتها في المحيط الهادي. وكذلك سبوتنيك الروسي رقم ٥ الذي أطلق في أغسطس ١٩٦٠ أيضاً وبقي يدور في الفضاء ١,١ من اليوم في قطع ناقص ذي حضيض على ارتفاع ٣٠٦ كيلو مترات وأوج على ارتفاع ٣٩٩ ثم أعيدت الكبسولة إلى الأرض سالمة بعد أن قطعت رحلتها ٧٠٤٠٠٠ كيلو متر، والفكرة في إعادة القمر الصناعي إلى الأرض مبنية على الأسس الأولية للميكانيكا، فنحن نعلم أن القمر الصناعي لا يستهلك وقودًا في أثناء دورانه في مداره، فإذا أريد إرجاعه إلى الأرض أخرج عن مداره بفصل الجزء المراد إرجاعه عن المرحلة الصاروخية المعدة لهذا الغرض، ووجهت حركته نحو الأرض ويكون ذلك بمثابة فرامل يتمم عملها مقاومة هواء الغلاف الجوي عندما تدخل فيه الكبسولة. إلا أن المسألة ليست بالبساطة التي تبدو عليها، فيجب حساب المسافة التي ينبغي أن تعمل عندها الفرامل بكل دقة، كما يجب أيضاً حساب الموقع التي ينتظر أن تلتقي فيه الكبسولة بالأرض، ولما كان احتكاك سطح

الكبسولة بالهواء الجوي يتسبب في رفع درجة الحرارة إلى ما يقرب من ١٠٠٠ºم فتزود الكبسولة بأجنحة ذات تصميم خاص تعمل على إنقاص درجة الحرارة إلى الحد الأدنى الذي يمكن الوصول إليه في حدود ٥٠٠ºم.

إن بزوغ فجر عصر الفضاء لمن المراحل ذات الأهمية القصوى في تاريخ البشرية. فإلى جانب تحقيق حلم الإنسان بجوب الفضاء، يمثل هذا العصر الانتقال بالإنسان من مرحلة التخمين والاستنتاج في استكشافه لأسرار الكون إلى مرحلة الاعتماد على أجهزة ومعامل تجوب الكون وتبقى في الفضاء طوع أمره، يستعين بها في إجراء تجاربه وأخذ أرصاده ومعرفة ما حرمه ارتباطه بالأرض من الوصول إليه من أسرار هذا الكون الذي نعيش فيه.

وأهم ما يصبو إليه الإنسان أن يصل إلى أسرار الطبيعة خاصة ما كان منها متصلاً اتصالاً وثيقاً بحياته اليومية. فهو يطمع في تسخير الظواهر الطبيعية لتوفر له حياة أفضل. أو التمكن من دفع أخطارها ليعيش عيشة آمنة. ويأتي بالتعرف على أسرار الأحوال الجوية في المرتبة الأولى، إذ أنها تؤثر تأثيراً مباشراً حياة الأفراد والأمم، فهي تمنحهم السعادة في أوقات رضاها وتصيبهم بالنكبات في ثورتها وغضبها. وأهم عامل يؤثر في الأحوال الجوية الأرضية هو الإشعاع والجسيمات التي تنبعث من الشمس، ومن هذه الإشعاعات الأشعة فوق البنفسجية التي تعمل على تأين طبقات الجو العليا، كما تعمل على تكوين طبقة من الأوزون تقيناً من الإشعاع وتعمل على امتصاص الهواء الجوي للحرارة. ومن المعتقد أن التغيرات التي تحدث

في طبقة الأوزون هي المسئولة عن تغير الظروف الجوية في طبقات الجو العليا وتحتوي الأقمار الصناعية التي أطلقت على أجهزة لقياس شدة الإشعاع وأطوال موجاتها وتغيرها مع الزمن، وبتجميع تلك المعلومات يمكن إيجاد العلاقة بينها وبين الأحوال الجوية على سطح الأرض، ولقد زودت بعض الأقمار بألات تصوير تليفزيونية أرسلت وما زالت ترسل صوراً للتكوينات السحابية، ويتراكم الآن لدى رجال الأرصاد الجوية بيانات ومعلومات لم تتوفر لهم من قبل، ويعمل العلماء الآن على تحليل تلك البيانات والاستفادة منها في التنبؤات الجوية بل ربما أمكنهم الاستفادة منها في التحكم في الأحوال الجوية، ولا يخفى علينا ما لهذا العمل من نتائج بالغة الأهمية لا للأعمال الحربية فحسب بل لحياة أفضل على سطح الأرض.

ويعتقد العلماء الأمريكيون أن الأقمار الصناعية سوف تفيد في الملاحة فيمكن عن طريقها أن تعين أي سفينة موقعها في عرض البحر بصرف النظر عن الأحوال الجوية أو صفاء السماء. وتزمع الولايات المتحدة الأمريكية إطلاق أربعة أقمار صناعية تكون جميعها في أفلاكها عام ١٩٦٢، ولقد أرسلت فعلا أول قمر في هذه المجموعة. «ترانسيت B-١» في أبريل عام ١٩٦٠، والغرض من هذه المجموعة هو انباء السفن بمواقعها في عرض المحيط والأساس في ذلك مبني على ظاهرة «دوبلر» التي تتسم بتردد معين (أو طول موجة) فإن طول الموجة يتغير بالنسبة للراصد الساكن ويتوقف التغير على سرعة المرصد المتحرك واتجاهه، ولا شك أن الكثير منا قد لاحظ هذه الظاهرة في أثناء وقوفه قرب شريط السكة

الحديدية وسماعه صفارة القاطرة وهي تمر به مسرعة، إذ يلاحظ انخفاض في نغمة الصفارة عن قيمتها الأصلية. وينطبق نفس الشئ على الموجات اللاسلكية، فالقمر الصناعي يصدر موجات لاسلكية ترصدها السفن ويحدث تغير مفاجئ في طول الموجة المستقبلة عند عبور القمر الصناعي سمت السفينة، ولما كان مسيرة محسوباً بدقة تامة، ومكانه معروف في أي لحظة من اللحظات فيمكن للسفينة أن تحدد موقعها بتعيين لحظة اجتياز القمر الصناعي لسمتها والرجوع إلى الجداول والخارطات لمعرفة موقع ذلك القمر من السماء.

وتحمل الأقمار الصناعية فيما تحمل من أجهزة كاشفات للأشعة الكونية، تلك الجسيمات النووية التي تنهال على الأرض من الفضاء الكوني وتتكاثر وتتفاعل مع ذرات الهواء الجوي. ولقد درس العلماء خصائص هذه الأشعة على سطح الأرض وعلى الارتفاعات التي تمكنوا من الوصول إليها بالبالونات والطائرات لكنهم لا يزالون في حيرة من أمر مصدر تلك الأشعة والوسيلة التي تكتسب بها الطاقة الهائلة التي تصلنا بها، ومن المعتقد أن دراسة تغير شدة الأشعة الكونية في الفضاء مع خطوط العرض قد تؤدي إلى زيادة معرفتنا بالمجالات المغناطيسية والكهربية التي تتسارع فيها تلك الجسيمات ومن ثم تؤدي إلى معرفة أعمق بالكون.

وعلى الرغم من أن علم الفضاء ما زال في مهده فلقد زودنا في هذه الفترة القصيرة من عمره بيانات عن الأرض والفضاء صححت ما لدينا من معرفة وأزادت عليه، فأنبأنا الصاروخ الأمريكي فانجارد الأول بما فيه من

أجهزة أن الأرض في شكل الكمثرى ذات بروز يبلغ ارتفاعه ٥٠ قدماً عند القطب الشمالي يقابله انخفاض بنفس العمق عند القطب الجنوبي، وأن انبعاج الأرض من عند خط الاستواء أقل مما قدره علماء القياسات الأرضية من قبل. كما أنبأتنا أجهزة قياس المغناطيسية التي زود بها أحد الصواريخ أن مجال المغناطيسية الأرضية يمتد إلى حوالي ٩٠٠٠٠ كيلو متر، أي ضعف المسافة التي قدرت له من قبل.

وليس هناك شك في أن الدافع المباشر لتقديم أبحاث الصواريخ والفضاء هو الأغراض الحربية سواء كانت للدفاع أو الهجوم، فنحن نعلم أن التفكير في الصواريخ بدأ على أنها قذائف موجهة تطلقها الدولة المحاربة على أهداف أعدائها عن بعد، وكان لا بد من التفكير في صد الهجمات الصاروخية أو على الأقل الإنذار بقدومها. ولقد أطلقت الولايات المتحدة الأمريكية في شهر مايو ١٩٦٠ قمراً صناعياً يزن ألفي كيلو جرام مزوداً بأجهزة بلغ وزنها ١٤٠٠ كيلو جرام ومن أهم مميزات هذا التابع وجود أجهزة في مقدمته تحس بالأشعة تحت الحمراء فيمكنها أن تكشف عن مصادر الحرارة غير العادية على الأرض أو في الجو. وعلى ذلك ففي استطاعة هذه الأجهزة التجسس على الصواريخ المنطلقة في الجو – بما تبعثه تلك الصواريخ من أشعة حرارية – وإرسال الإنذارات إلى محطات المراقبة الأرضية.

ولم يقتصرْ استكشاف الفضاء على إرسال التوابع الأرضية فقط بل أرسلت روسيا صاروخها «لونك رقم ٢» في سبتمبر ١٩٥٩ لاستكشاف

الطريق إلى القمر، فأصابه إصابة مباشرة ثم تبعه «لونك رقم ٣» في أكتوبر من نفس العام لاستكشاف الجانب الآخر من القمر الذي لا يمكننا رؤيته من الأرض على الإطلاق، فالتقط صوراً لذلك الجانب، كما أطلقت الولايات المتحدة الأمريكية عدة صواريخ لم تبلغ القمر لكنها أرسلت معلومات جديدة عن الإشعاعات والتيارات الكهربية في الفضاء حول الأرض فاكتشف الصاروخ (المستكشفة رقم ٦) تياراً كهربياً شدته خمسة ملايين من الأمبيرات يسري حول الأرض على ارتفاع يبلغ حوالي ٤٠٠٠٠ كيلو متر منها.

ولم يقف التسابق في رحلات الفضاء عند حد الوصول إلى القمر بل تعده إلى الكواكب الأخرى وأرسلت كل من روسيا وأمريكا توابع للشمس، فأطلقت روسيا «لونك رقم ٦» في يناير ١٩٥٩ ليدور حول الشمس في فلك يبعد أوجه عنها ١٢٠ مليون ميل وحضيضه ٩١,١ من مليون ميل ويتم دورته حولها في ٤٤٤ يوماً. كما أرسلت أمريكا «الرائد رقم ٤» في مارس ١٩٥٩ ليدور في فلك حول الشمس يبعد أوجه عنها ١٠٦,١من مليون ميل وحضيضه ٩١,١ من مليون ميل ويتم دورته حولها في ٣٩٥ يوماً، وفي مارس ١٩٦٠ أرسلت أمريكا «الرائد رقم ٥» ليدور حول الشمس في فلك يبعد أوجه عنها ٩٢ مليون ميل وحضيضه ٧٤,٧من مليون ميل.

إننا ما نزال في بداية الطريق، فرحلتا جاجارين أو شبر ما هما إلا بمثابة تجربة مركبة جديدة في جزء من ألفي جزء من الطريق الذي ينتظر أن

تقطعه، وأن الإنسان لينظر بعين كلها الثقة والأمل إلى اليوم الذي يصبح فيه السفر إلى القمر بل إلى المريخ والزهرة مثل السفر إلى الإسكندرية أو دمشق، أما العلماء فيضعون كل آمالهم في مشروعات المستقبل واستبدال الإنسان بمجموعة الأجهزة والآلات التي يعبئون بها الآن مجساتهم للفضاء إذ لا شك أن الإنسان الراكب متن مجسات الفضاء يمكنه بما آتاه الله من نعمة التفكير والعقل أن يتصرف في المواقف التي لا يمكن لغير البشر أن يتصرفوا فيها – سيأتي ذلك اليوم وسوف يخرج الناس أحادى وجماعات من أرضهم الصغيرة وينفذوا من غلالتها الرقيقة (بالنسبة للأبعاد الكونية) ليروا بأنفسهم حقيقة هذا الكون وضآلة أرضهم بالنسبة له.



فهرس

القسم الرابع

القسم الخامس